Projet de Fin d'Etudes

Interactions entre études géotechniques et études environnementales

Méthodes d'investigation, études, complémentarité et limites de prestation

Marie RENAULT

Elève-ingénieur de 5ème année

Spécialité Génie Civil

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier l'INSA de Strasbourg et l'ensemble des professeurs qui nous a dispensé une formation de qualité, réel atout au sein du monde professionnel. Nous avons ainsi acquis une culture complète du Génie Civil qu'il nous faudra maintenant peaufiner au gré de nos expériences.

Pour ces quatre mois de Projet de Fin d'Etudes (PFE), je remercie l'ensemble des équipes de l'agence Normandie de Ginger CEBTP pour leur accueil. Merci aux services Géotechnique et Expertise Environnementale de m'avoir intégrée à leur travail et de m'avoir transmis leur savoir-faire. Merci aux assistantes pour leur aide et leur bonne humeur.
Merci également au responsable de l'agence, M. LEFEBVRE, mon tuteur, qui m'a permis de réaliser mon PFE dans ces conditions et qui m'a guidée dans ma réflexion.

Enfin, je remercie mon tuteur à l'INSA, M. REGENASS, professeur de Mécanique des Sols, pour sa présence et ses conseils tout au long de cette période.

Sommaire

Remerciements 2

Introduction 6

1. Etat des lieux dans l'entreprise 7
   1.1. Présentation du groupe GINGER CEBTP 7
      1.1.1. Historique 7
      1.1.2. Domaines d'activités 7
      1.1.3. Moyens du Groupe 8
      1.1.4. Implantations géographiques 8
   1.2. L'agence de Normandie 9
      1.2.1. Généralités 9
      1.2.2. Présentation des services concernés par le PFE 9
      1.2.3. Certifications 10
   1.3. Définition de la mission à réaliser : cadre réglementaire 11
      1.3.1. Missions Géotechniques 11
      1.3.2. Missions Environnementales 13
   1.4. Le déroulé des missions : cadre organisationnel 19
      1.4.1. Définition du programme 19
      1.4.2. Le terrain : sondages, échantillonnages et essais in situ 20
      1.4.3. Le laboratoire 22
      1.4.4. Le rapport 22

2. Interactions entre missions Géotechnique et Environnementale 23
   2.1. Construction d'un pavillon : Etudes de sol et d'infiltration 23
      2.1.1. Présentation du contexte 23
      2.1.2. Préparation du chantier 24
      2.1.3. Intervention sur terrain 25
      2.1.4. Interprétation des essais 25
      2.1.5. Rédaction des rapports 26
      2.1.6. Conclusion 27

2.2. Extension industrielle : Fondations profondes et pollution de la nappe phréatique 28
2.2.1. Présentation du projet 28
2.2.2. Préparation du chantier 29
2.2.3. Intervention sur terrain 30
2.2.4. Interprétation des essais 31
2.2.5. Rédaction des rapports 32
2.2.6. Propositions des entreprises exécutrices des pieux 34
2.2.7. Conclusion 35
2.3. Contournement routier : stabilité de talus et zones humides 36
2.3.1. Présentation du projet 36
2.3.2. Description du site 36
2.3.3. Contexte de la mission 37
2.3.4. Prise en compte du Dossier Loi sur l'Eau 38
2.3.5. Etude Géotechnique d'Exécution phase Etude (G4) 41
2.3.6. Conclusion 42

3. Bilan et schémas d'interactions 43

Conclusion 45

Bibliographie 46

Annexes 47

Annexe n° 1 : Organigramme de l'agence Ginger CEBTP Normandie 48
Annexe n° 2 : Feuille de route des investigations de terrain 49
Annexe n° 3 : Fiche de quart d'heure de préparation de chantier 50
Annexe n° 4 : Principe du pénétromètre dynamique 51
Annexe n° 5 : Détail de dimensionnement d'une tranchée d'infiltration des eaux pluviales 52
Annexe n° 6 : Coefficients de Montana pour les durées de pluie considérées 56
Annexe n° 7 : Valeurs de références utilisées pour déterminer 57
la qualité des eaux souterraines 57
Annexe n° 8 : Tableau et diagramme d'évolution des teneurs en arsenic de janvier à mars 2014 58
Annexe n° 9 : Principe du pressiomètre et coupes des sondages 59
Annexe n° 10 : Détail de l'ébauche dimensionnelle d'un pieu 63
dans le cadre du projet étudié 63
Annexe n° 11 : Calcul du facteur de portance k_p 70
Annexe n° 12 : Tableau F.4.2.1 de la norme NF P 94-262 71
Annexe n° 13 : Tableau A.1 de la norme NF P 94-262 72
Annexe n° 14 : Calcul de la pression limite nette équivalente p^*_{le} 73
Annexe n° 15 : Tableau F.2.1 de la norme NF P 94-262 74
Annexe n° 16 : Tableau F.5.2.1 de la norme NF P 94-262 75
Annexe n° 17 : Tableau F.5.2.2 de la norme NF P 94-262 77
Annexe n° 18 : Tableaux C.2.3.1 et C.2.3.2 de la norme NF P 94-262 78
Annexe n° 19 : Tableaux 14.2.1.1 et 14.2.1.2 de la norme NF P 94-262 79
Annexe n° 20 : Tableaux I.1.3.1 et I.1.3.2 de la norme NF P 94-262 80
Annexe n° 21 : Valeurs de calcul en compression et en traction 81
Annexe n° 22 : Calcul de la longueur de transfert, de l'effort tranchant et du moment fléchissant 83
Annexe n° 23 : Définition du frottement négatif 85
Annexe n° 24 : Extrait du Code de l'Environnement 86
Annexe n° 25 : Coupes des zones humides créées le long du projet 87
Annexe n° 26 : Vérification de la stabilité des talus sur TALREN 89

Introduction

Dans l'acte de construire ou d'aménager, le sol est l'interface directe entre le projet et le milieu naturel. En effet, le sol, plus ou moins superficiellement en fonction du projet, est le support de l'ouvrage et il peut à ce titre être sollicité structurellement (Mécanique des Sols) mais il peut également être impacté de manière physico-chimique (Environnement).

La problématique de notre époque est principalement de continuer à construire et à aménager des projets à la fois de plus en plus poussés techniquement, mais aussi plus respectueux de l'environnement.

Face à l'industrialisation et à l'urbanisation, le sol dans sa globalité (la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie) est vulnérable, ce qui se répercute sur le milieu naturel : pollutions souterraine et superficielle, des sols et des eaux et imperméabilisation croissante perturbant l'écosystème (inondations, faune et flore, etc.).

Plus ou moins récemment, de nouvelles règlementations sont venues encadrer ces aménagements. Des processus d'études d'impacts, de mesures compensatoires obligatoires et de contrôles ont été instaurés afin de maîtriser au mieux les risques engendrés sur le milieu naturel et donc sur la santé et la sécurité humaine, animale et végétale.

C'est dans ce cadre que des Bureaux d'Etudes d'Expertises Environnementales interviennent maintenant sur une large palette d'aménagements, bien en amont des études de Projet.
Qu'elles concernent des projets à petite ou à grande échelle, ces études environnementales sont de plus en plus fréquentes, en phase même de devenir systématiques.

Il faut savoir que ces études sont susceptibles d'impacter l'essence même d'un projet. En effet, les mesures compensatoires peuvent imposer des installations, non prévues initialement, qui peuvent être incompatibles avec certaines parties du projet.

C'est dans ce contexte que démarre le présent Projet de Fin d'Etudes (PFE) : Interactions entre Etudes Géotechniques et Etudes Environnementales.
Ce PFE, réalisé au sein de l'entreprise Ginger CEBTP, aura pour but de définir ces interactions en termes de méthodes d'investigation, d'études, de complémentarité et de limites de prestation.

Pour se faire, un état des lieux de l'entreprise et des deux services concernés (Géotechnique et Expertises Environnementales) sera nécessaire : organisation des missions (investigations, laboratoire, études), moyens, contraintes….

Ce premier travail va permettre de cadrer le sujet pour ensuite aborder les interactions existantes entre ces deux services. On pourra alors tenter d'avoir une réflexion sur les moyens d'optimiser les prestations où interviennent ces interactions.

Suite à cette analyse, la finalité de ce PFE va être de définir un schéma d'interactions à privilégier. Ceci permettra de mieux encadrer ces prestations couplées (Géotechnique et Environnement : interactions et spécificités à chaque métier).

1. Etat des lieux dans l'entreprise

1.1. Présentation du groupe GINGER CEBTP

1.1.1. Historique

1999 : Création du Groupe Ginger (acronyme de Groupe Ingénierie Europe) qui regroupe CEBTP, Séchaud Bossuyt (Pôle Construction du Groupe) et la Holding Financière[1] K2.

Années 2002-2005 : Ginger Groupe connaît une forte croissance externe, se matérialisant par le rachat d'une quinzaine de sociétés en France et à l'étranger dans les secteurs de la construction, de l'environnement et des télécommunications.

2009 : Ginger réalise un chiffre d'affaires de 269,5 millions d'euros avec près de 2 000 collaborateurs répartis sur 133 sites en France, 20 en France d'outre-mer et 25 à l'international.

15 juin 2010 : Ginger rejoint le groupe néerlandais Grontmij. Ce rapprochement a donné naissance au quatrième acteur européen de conseil en ingénierie en Europe avec un effectif de près de 10 000 personnes, un chiffre d'affaires de 1,1 milliard d'euros et plus de 350 agences dans le monde.

2013 : Grontmij projette pour sa filiale française Ginger un changement de cap radical, annonçant son intention de se séparer de la branche expertise (CEBTP), élément principal du réseau d'agences Ginger. Cela constitue un revirement stratégique, destiné à assainir la santé financière de la maison mère et à recentrer l'activité.

Septembre 2013 : Ginger CEBTP redevient indépendant.

1.1.2. Domaines d'activités

GINGER CEBTP intervient pour l'ensemble de la chaîne de la construction en y apportant son expertise technique, scientifique et humaine, dans de nombreux domaines : bâtiment, ouvrages d'art, routes, ouvrages industriels, monuments historiques, logements...

GINGER CEBTP est reconnu comme un acteur majeur avec plus d'une vingtaine de domaines de compétences, dont notamment :

- La géotechnique, où le groupe occupe une place de leader en France avec près d'une centaine d'ateliers de sondage et de laboratoires de mécanique des sols ;
- Les diagnostics de pathologie des structures et des matériaux ;
- les essais et certifications pour les produits de la construction ;
- La veille réglementaire...

GINGER CEBTP offre ainsi un pôle d'expertise au service de tous les acteurs de la construction : maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, entreprises du BTP, bureaux d'études, bureaux de contrôles, industriels, experts, collectivités locales, architectes, etc.

[1] Holding financière : Société souvent liée à un groupe bancaire qui finance les entreprises ou participe à la formation de groupes

1.1.3. Moyens du Groupe

GINGER CEBTP emploie environ 1100 personnes et dispose de l'un des plus importants potentiels d'ingénieurs et de techniciens dans son secteur.

Le groupe met en œuvre toutes ses compétences humaines et matérielles pour accompagner ses clients dans la réalisation de leurs projets.

- 1 100 collaborateurs ;
- 50 implantations équipées de laboratoires de proximité ;
- 6 laboratoires nationaux dédiés aux matériaux et aux produits de la construction ;
- Plus de 150 matériels de prélèvement et de forage ;
- Matériels de mesure et instrumentation pour diagnostic in situ.

1.1.4. Implantations géographiques

L'activité opérationnelle de Ginger CEBTP s'exerce au travers de plusieurs entités sur l'ensemble du territoire de la manière suivante :

- 35 agences majeures en France métropolitaine ainsi que de nombreuses agences locales,
- 4 agences dans les DOM-TOM (Fort de France, Cayenne, Nouméa et Papeete).

Ces implantations permettent la représentation de toutes les compétences de Ginger CEBTP à l'échelon national et local, sous l'égide d'un directeur général. Chaque agence dispose d'un service administratif prenant en charge l'ensemble de la gestion clientèle, à tout moment.

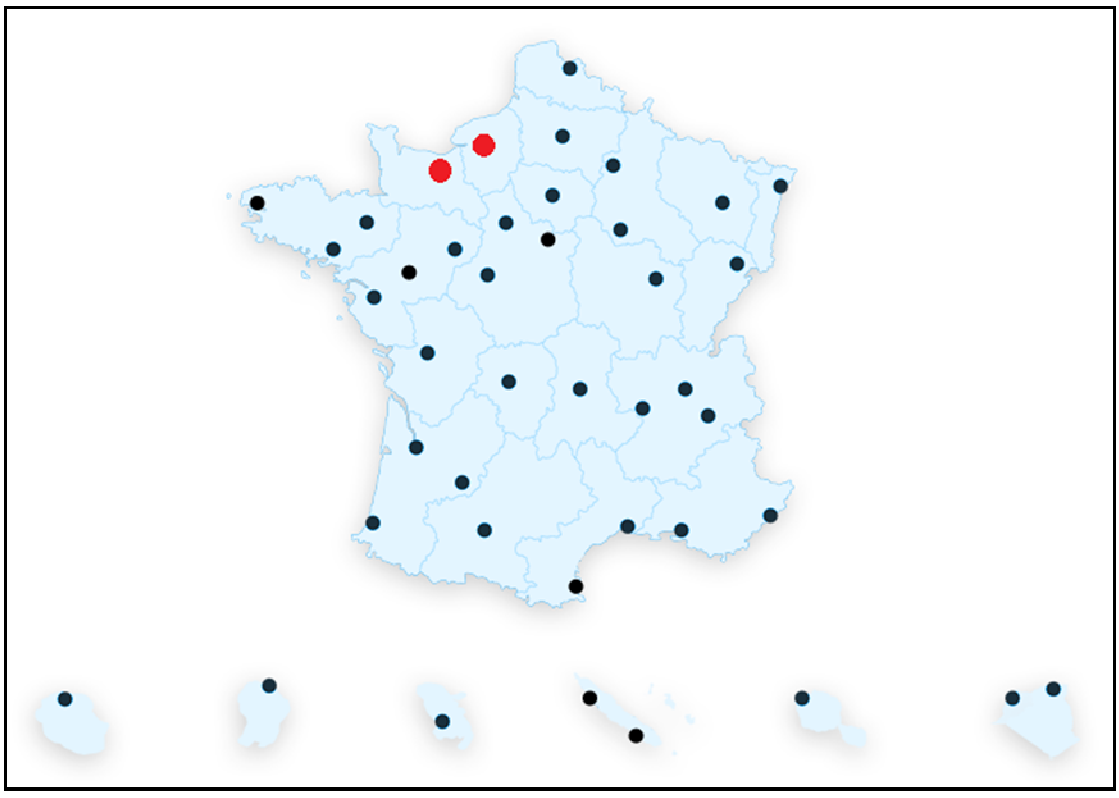


Figure 1 - Implantations de Ginger CEBTP, France Métropolitaine et DOM-TOM - Source : www.groupe-cebtp.com

1.2. L'agence de Normandie

1.2.1. Généralités

L'agence de Normandie possède deux sites :

- Le site de Rouen qui s'occupe des affaires situées en Haute-Normandie ;
- Le site de Caen pour les affaires localisées dans la région Basse-Normandie.

Les deux sites échangent constamment, notamment pour prévoir leur planning, mais aussi pour partager leurs expériences et compétences.

Plusieurs services interviennent dans cette agence :

- Le service Essais, Contrôles, Route et Certification ;
- Le service Expertise et Pathologie ;
- Le service Géotechnique ;
- Le service Expertises Environnementales.

Ce sont dans les deux derniers services que j'ai pu travailler dans le cadre de mon PFE.

L'organigramme de l'agence est joint en annexe n° 1.

1.2.2. Présentation des services concernés par le PFE

Service Expertises Environnementales

Le Service Expertises Environnementales est rattaché à la Cellule Environnement de la Région Grand Nord (qui regroupe les agences de Strasbourg à Caen, sans compter Paris).

Ses prestations sont les suivantes :

- Etudes pour la Gestion des Eaux Pluviales ;
- Dossiers Loi sur l'Eau ;
- Diagnostic Pollution des Sols et des Eaux.

Service Géotechnique

Ce service répond à l'ensemble des missions de la norme NF P 94-500 (G1 à G5). Ces missions peuvent concerner toutes les phases d'un projet de construction ou d'aménagement (Esquisse, APS, APD, DCE, EXE, etc.). Pour chaque phase, des objectifs différents vont être donnés aux études.

1.2.3. Certifications

Ginger CEBTP est certifié ISO 9001 (management de la qualité) et OHSAS 18001 (management de la santé et de la sécurité au travail) sur l'ensemble de ses activités.

De plus, le Groupe possède une qualification OPQIBI : il s'agit d'une reconnaissance externe de la compétence de Ginger CEBTP en matière d'expertise et d'ingénierie.

Enfin, l'agence de Normandie présente la spécificité d'être certifiée MASE (Manuel d'Amélioration Sécurité des Entreprises). Cette certification est indispensable pour l'agence qui travaille de plus en plus avec les entreprises pétrochimiques de la région.

1.3. Définition de la mission à réaliser : cadre réglementaire

1.3.1. Missions Géotechniques

Les missions géotechniques sont encadrées par la Norme NF P 94-500 qui définit les missions d'ingénierie géotechniques (classification et spécification) ; elle a été révisée en novembre 2013.

Ce document précise le contenu et les limites des missions d'ingénierie géotechnique ainsi que leur enchaînement au cours de la conception, de la réalisation et de la vie d'un aménagement de site ou d'un ouvrage afin de contribuer à la maîtrise des risques géotechniques.

L'attribution d'une mission d'ingénierie géotechnique va donc dépendre de l'avancement du projet. En effet, pour chaque phase du projet, une mission d'ingénierie géotechnique avec des objectifs spécifiques doit être entreprise par le maître d'ouvrage :

- À l'étape 1, l'étude géotechnique préalable (G1) comprend deux phases :
  - Avant l'APS : *la phase Étude de Site (ES)* qui permet de définir un modèle géologique préliminaire du site, avec ses principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs pour un futur ouvrage non encore étudié ;
  - Pour la mise au point de l'APS : *la phase Principes Généraux de Construction (PGC)* qui synthétise les données géotechniques à prendre en compte à ce stade et propose certains principes généraux de construction envisageables pour les ouvrages géotechniques. Elle ne comprend pas d'ébauche dimensionnelle.

- Les contraintes géotechniques de site étant conditionnées par la nature de l'ouvrage (géométrie, sollicitations) et variables dans le temps (phasage des travaux notamment), une fois l'ouvrage défini, il faut procéder à l'étape 2, l'étude géotechnique de conception (G2), réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre, qui comprend trois phases :
  - Pour la mise au point de l'APD : *la phase Avant-projet (AVP)* qui définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte à ce stade et les principes de construction des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, etc.). Elle fournit une ébauche dimensionnelle ;
  - Pour la mise au point du Projet : *la phase Projet (PRO)* qui définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier). Elle établit les notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques et des notes de calcul de dimensionnement niveau projet de ces ouvrages ;

- Pour l'établissement du DCE et l'ACT : *la phase Dossier de Consultation des Entreprises / Assistance à l'établissement des Contrats de Travaux (DCE / ACT)* qui établit ou participe à la rédaction des documents techniques nécessaires à la consultation des entreprises et à leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques. Elle assiste le maître d'ouvrage ou la maîtrise d'œuvre pour la sélection des entreprises.

- À l'étape 3 de réalisation des ouvrages géotechniques, la supervision géotechnique d'exécution (G4), réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre, comprend deux phases interactives :

  - *la phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution* qui donne un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et des méthodes d'exécution, des adaptations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur et du plan de contrôle ;

  - *la phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution* qui, par interventions ponctuelles sur le chantier, donne un avis sur la pertinence :
    - du contexte géotechnique ;
    - du comportement de l'ouvrage et des avoisinants ;
    - de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée.

Par ailleurs, il existe une mission d'ingénierie géotechnique qui doit être réalisée par l'entreprise exécutrice des travaux, sur les données géotechniques fournies par le maître d'ouvrage à la phase G2 DCE/ACT. Cette mission, l'étude et suivi géotechniques d'exécution (G3), qui doit être réalisée à l'étape 3, comprend deux phases interactives :

- *la phase Étude* qui établit la note d'hypothèses géotechniques et donne le dimensionnement des ouvrages géotechniques, leurs méthodes et conditions d'exécution, leurs phasages généraux ;

- *la phase Suivi* qui, par un suivi en continu des travaux géotechniques, permet d'une part de valider le modèle géologique et les hypothèses géotechniques du site, et d'autre part de s'assurer que le comportement en cours d'exécution de l'ouvrage et des avoisinants concernés est conforme aux prévisions ou de mettre en œuvre à temps les adaptations nécessaires.

Enfin, il existe une mission d'ingénierie géotechnique particulière qui n'est pas forcément intégrée à l'enchaînement ci-dessous. *Le diagnostic géotechnique (G5)*, convient à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques dans le cadre d'une mission ponctuelle : par exemple, causes géotechniques de la survenance d'un désordre, étude des solutions de renforcement d'un ouvrage existant, recherche de cavités souterraines…

1.3.2. Missions Environnementales

Dossiers Loi sur l'Eau

Les premiers textes modernes concernant le droit de l'eau remontent aux codes napoléoniens. Leur objectif principal était de déterminer le régime de propriété de l'eau. La qualité de l'eau distribuée est rapidement devenue un enjeu majeur de santé publique face aux risques d'épidémie.

Cependant, les fondements de la politique de l'eau actuelle sont essentiellement issus de trois lois :

- La loi sur l'eau du 16 décembre 1964 qui a organisé la gestion décentralisée de l'eau par bassin versant. C'est cette loi qui a créé les agences de l'eau et les comités de bassin ;
- La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui a renforcé l'impératif de protection de la qualité et de la quantité des ressources en eau. Elle a mis en place de nouveaux outils de la gestion des eaux par bassin : les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et les SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) ;
- La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006 qui impose la maîtrise des eaux pluviales, à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif, dans les politiques d'aménagement de l'espace.

En effet, les extensions des zones urbaines et des infrastructures de transports sont susceptibles d'aggraver les effets néfastes du ruissellement pluvial. L'imperméabilisation des sols entraîne :

- Une concentration rapide des eaux pluviales et une augmentation des pointes de débit aux exutoires pouvant s'accompagner de problèmes de débordement ;
- Des apports de pollution pouvant être très perturbants pour les milieux récepteurs.

La constitution d'un Dossier Loi sur l'Eau (DLE) s'appuie sur les articles L 214-1 à L 214-6 du Code de l'Environnement.

Ces articles définissent quels types de projets sont soumis à la rédaction d'un DLE. En résumé, il s'agit des installations non classées pour la protection de l'environnement (les installations classées pour la protection de l'environnement font l'objet d'autres procédures) et des projets réalisés à des fins non domestiques (valeurs seuils précisées à l'article R.214-1) qui entraînent des prélèvements ou des rejets sur les eaux superficielles ou souterraines, une modification de l'écoulement des eaux, la destruction de zones d'habitat (faune et flore).

Les projets hydroélectriques ne sont pas soumis à la rédaction d'un DLE (autres autorisations).

Par ailleurs, il existe 2 types de DLE :

- L'autorisation qui concerne les projets susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publique, de nuire au libre écoulement des eaux, de réduire la ressource en eau, d'accroître notablement le risque d'inondation, de porter gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique ;
- La déclaration qui concerne les projets n'étant pas susceptibles de présenter de tels dangers, mais qui doivent néanmoins respecter les prescriptions édictées par le Code l'Environnement.

Il faut savoir que les DLE d'autorisation peuvent faire l'objet d'un rejet, d'une abrogation ou d'une modification, par application des objectifs du SDAGE (par exemple : risque sur les milieux aquatiques, inondations, salubrité publique, etc.).

Conformément à l'article R. 214-32 du Code de l'Environnement, un DLE de déclaration doit comprendre un document :

- Indiquant les incidences du projet sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, y compris de ruissellement, en fonction des procédés mis en œuvre, des modalités d'exécution des travaux ou de l'activité, du fonctionnement des ouvrages ou installations, de la nature, de l'origine et du volume des eaux utilisées ou affectées et compte tenu des variations saisonnières et climatiques ;
- Comportant, lorsque le projet est de nature à affecter de façon notable un site NATURA 2000 au sens de l'article L. 414-4, l'évaluation de ses incidences au regard des objectifs de conservation du site ;
- Justifiant, le cas échéant, de la compatibilité avec le SAGE ou le SDAGE et de sa contribution à la réalisation des objectifs visés à l'article L. 211-1 ainsi que des objectifs de qualité des eaux prévus par l'article D. 211-10 ;
- Précisant s'il y a lieu les mesures correctives ou compensatoires envisagées.

Ce document est adapté à l'importance du projet et de ses incidences. Les informations qu'il doit contenir peuvent être précisées par un arrêté du ministre chargé de l'environnement.

Par ailleurs, les moyens de surveillance ou d'évaluation des prélèvements et des déversements prévus sont également fournis avec le dossier de déclaration.

Un DLE d'autorisation doit comporter les mêmes renseignements, avec des précisions, notamment :

- L'évaluation systématique des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites ;
- La justification de la compatibilité du projet avec le SAGE ou le SDAGE et avec les dispositions du plan de gestion des risques d'inondation et de sa contribution à la réalisation des objectifs visés à l'article L. 211-1 ainsi que des objectifs de qualité des eaux prévus par l'article D. 211-10.

Etudes d'infiltration des eaux pluviales

Les études d'infiltration des eaux pluviales peuvent être rendues obligatoires par la réglementation ou, à plus petite échelle, par la commune.
En effet, la construction d'un ouvrage sur un terrain « nu » entraîne une imperméabilisation qu'il faut contrebalancer par la mise en place de tranchées ou de bassins d'infiltrations.

Par exemple, la « doctrine » de la Police de l'Eau de Seine-Maritime indique, qu'en termes de gestion des eaux pluviales, les objectifs à atteindre quantitativement sont :

- Infiltrer l'équivalent du volume décennal ou centennal (en fonction des communes) ruisselé le plus défavorable, si la perméabilité des sols le permet (K > 1.10-6 m/s) ;
- Assurer la vidange du volume de stockage des eaux pluviales en moins de deux jours pour un événement centennal le plus défavorable et en moins d'une journée pour un événement décennal le plus défavorable.

Si la perméabilité des sols ne permet pas l'infiltration des eaux ($K < 1.10^{-6}$ m/s), il faut alors rejeter ces eaux dans les réseaux (demande d'autorisations).

Les investigations ont pour but de déterminer la perméabilité du sol plus ou moins superficiellement.

A partir de cette perméabilité, de la surface d'imperméabilisation engendrée par l'ouvrage, ainsi que de la durée et de la période de retour de la pluie considérée, on peut estimer le volume à stocker.

Le volume géométrique de la tranchée est ensuite déterminé d'après le volume à stocker et la porosité du matériau de la tranchée. Enfin, les dimensions de la tranchée sont déduites de son volume et de l'espace disponible sur la parcelle.

Sites et sols pollués

Les missions dans le domaine des sites et sols pollués sont encadrées par la Norme NF X 31-620 de juin 2011 qui définit, entre autres, les prestations de services relatives aux pollutions des sols et des eaux.

L'enchaînement des missions d'ingénierie environnementale doit suivre les étapes d'élaboration et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques environnementaux. Chaque mission s'appuie sur des investigations environnementales spécifiques. Il appartient au Maître d'ouvrage ou à son mandataire de veiller à la réalisation successive de toutes ces missions par une ingénierie environnementale.

Les prestations fournies par les prestataires de gestion des sites pollués sont divisées en trois domaines :

- Domaine A : Etudes/assistance/contrôle ;
- Domaine B : Ingénierie des travaux de réhabilitation ;
- Domaine C : Exécution des travaux de réhabilitation.

Le service Expertises Environnementales de l'agence de Normandie ne travaille que sur des missions appartenant au domaine A.

Les prestations couvertes par le domaine A – Etudes, assistance et contrôle se décomposent suivant 2 approches différentes :

- En 8 offres globales de prestation ;
- En 15 offres de prestations élémentaires (sous-missions).

Les offres globales et leurs objectifs sont résumés dans le tableau ci-dessous (les missions réalisées par l'agence de Normandie apparaissent en rouge) :

Code	Offres globales de prestations	Objectifs
AMO	Assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO).	Assister et conseiller son client pendant tout ou partie de la durée du projet.
LEVE	Levée de doute pour savoir si un site relève ou non de la méthodologie nationale des sites pollués.	Identifier les sites qui n'ont pas été pollués par des activités industrielles et/ou de service (sites industriels, zones de stockage, décharges, etc.), ou par des activités d'épandage des effluents ou de déchets.

Code	Offres globales de prestations	Objectifs
EVAL	Evaluation (ou audit) environnementale des sols et des eaux souterraines lors d'une vente/acquisition d'un site.	Identifier, quantifier et hiérarchiser les impacts environnementaux sur les sols et les eaux souterraines traduisant un passif résultant d'activités passées ou présentes sur le site. Déterminer les conséquences économiques liées aux constats.
CPIS	Conception de programmes d'investigations ou de surveillance – Réalisation du programme – Interprétation des résultats- Elaboration de schémas conceptuels, de modèles de fonctionnement et de bilans quadriennaux.	Définir un programme d'investigations ou de surveillance. Mettre en œuvre le programme de prélèvements. Interpréter les résultats. Elaborer en cas de besoin un bilan quadriennal et proposer une définition ou une modification des prescriptions des arrêtés préfectoraux imposant une surveillance des milieux.
PG	Plan de gestion dans le cadre d'un projet de réhabilitation ou d'aménagement d'un site.	Définir des modalités de réhabilitation et d'aménagement d'un site pollué. Supprimer ou, à défaut, maîtriser les sources de pollution et leurs impacts.
IEM	Interprétation de l'état des milieux.	Distinguer les milieux avec des usages déjà fixés qui : ne nécessitent aucune action particulière ; peuvent faire l'objet d'actions simples de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et leurs usages constatés ; nécessitent la mise en œuvre d'un plan de gestion.
CONT	Contrôle : de la mise en œuvre du programme d'investigation ou de surveillance ; de la mise en œuvre des mesures de gestion.	Vérifier la conformité des travaux d'exécution des ouvrages d'investigations ou de surveillance. Contrôler, au fur et à mesure de leur avancement, que les mesures de gestion (opérations de dépollution, réalisation des aménagements, etc.) sont réalisées conformément aux dispositions prévues.
XPER	Expertise dans le domaine des sites et sols pollués.	Réaliser une revue critique de l'intégralité du dossier ou répondre à des questions spécifiques.

Les offres élémentaires complémentaires aux offres globales sont listées dans le tableau ci-dessous (les missions réalisées par l'agence de Normandie apparaissent en couleur pourpre) :

Code	Offres élémentaires de prestations
Diagnostic de l'état des milieux	
A100	Visite du site.
A110	Etudes historiques, documentaires et mémorielles.
A120	Etude de vulnérabilité des milieux.
A200	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les sols.
A210	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les eaux souterraines.
A220	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les eaux superficielles et/ou sédiments.
A230	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les gaz du sol.
A240	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur l'air ambiant et les poussières atmosphériques.
A250	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les denrées alimentaires.
A260	Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les terres excavées.
Evaluation des impacts sur les enjeux à protéger	
A300	Analyse des enjeux sur les ressources en eaux.
A310	Analyse des enjeux sur les ressources environnementales.
A320	Analyse des enjeux sanitaires.
A330	Identification des différentes options de gestion possibles et réalisation d'un bilan coûts/avantages.
Autres compétences	
A400	Dossiers de restriction d'usage, de servitudes.

1.4. Le déroulé des missions : cadre organisationnel

1.4.1. Définition du programme

Programme des investigations

Le choix des investigations à réaliser va dépendre du projet. En effet, plusieurs critères interviennent :

- La surface d'emprise du projet : l'ensemble de cette surface doit être convenablement balayée pour tenter d'être le plus exhaustif et représentatif possible ;
- L'état d'avancement du projet et les objectifs de la mission à réaliser : en fonction du stade du projet, les caractéristiques à déterminer ne seront pas les mêmes. Ceci va conditionner par exemple le type d'essais à réaliser in situ et la profondeur des sondages ;
- L'histoire et l'expérience du site : ce critère intervient systématiquement dans le cadre des études de pollution, l'histoire du site nous informe sur les polluants pouvant être rencontrés et leur localisation approximative. Dans le cadre des autres missions environnementales ou géotechniques, la prise en compte de ce critère est également important (investigations antérieures, recherche documentaire, connaissances du client, etc.) ;
- L'impact financier : ce critère n'est pas à négliger, l'idée est d'optimiser au mieux le programme pour répondre qualitativement à la mission tout en restant le plus compétitif possible.

Par exemple, les essais de type pénétromètre dynamique sont plus rapides à réaliser et moins coûteux que les essais pressiométriques, mais ces derniers permettent d'obtenir des caractéristiques reconnues exploitables par les normes de calculs. Il en est de même pour les essais Porchet (qui donnent une perméabilité superficielle) et les essais MATSUO (pour obtenir une perméabilité plus profonde et représentative).

Programme de laboratoire

De la même manière, la définition du programme de laboratoire va être directement liée à la nature et à l'avancement du projet.

- Concernant les études de pollution : le choix des composés à analyser en laboratoire va dépendre de l'histoire du site mais aussi du type de mission à réaliser. Par exemple, pour une mission de diagnostic dans le cadre d'une évacuation des terres en décharge, un Pack ISDI (Installations de Stockage des Déchets Inertes) est préconisé car il permet d'analyer les polluants concernés par l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux ISDI. Par ailleurs, les indices visuels et olfactifs rencontrés lors des investigations servent de base pour choisir quels échantillons doivent être analysés ;

- Concernant les études géotechniques : les essais en laboratoire sont réalisés dès lors que des travaux de terrassement en déblais / remblais interviennent. En effet, les essais en laboratoire (identification GTR, essais Proctor / IPI, aptitude au traitement, essai Triaxial, etc..) vont permettre de caractériser le sol et d'adapter ainsi son utilisation en phases provisoire et définitive.

1.4.2. Le terrain : sondages, échantillonnages et essais in situ

La préparation

Dès le stade de la réponse à un appel d'offre ou la rédaction d'un devis, la préparation de l'intervention commence. En effet, il faut au plus tôt s'assurer que les machines nécessaires aux investigations peuvent pénétrer sur le site étudié (gabarit).

Une fois la commande passée, le technicien en charge du chantier peut lancer les DICT (Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux) : il s'agit de prévenir de notre intervention les exploitants des différents réseaux ; cette démarche est obligatoire. Ensuite, grâce aux plans de réseaux communiqués, les différents sondages peuvent être implantés avec un risque d'incident moindre.

Cette étape est importante dans la chaîne « qualité et sécurité » afin de garantir la pérennité des ouvrages en place, mais surtout d'assurer la sécurité des intervenants.

Enfin, selon les chantiers et les clients, les exigences de préparation de chantier peuvent varier. On peut, par exemple, mettre en place un Plan De Prévention (PDP) auquel l'ensemble des intervenants doit participer : celui-ci identifie les principaux risques et fixe les règles à respecter pour garantir la sécurité.
Ce type de dispositif est indispensable pour les sites présentant de la coactivité (sites industriels, ports, etc.).

Quel que soit le type de chantier, 2 documents sont obligatoires :

- La feuille de route (cf. Annexe n° 2) : elle fait part du programme des investigations et transmet aux équipes de sondeurs des informations pratiques (accès, contact, etc.) ;
- La fiche quart d'heure de préparation de chantier (cf. Annexe n° 3) : le chargé d'affaire donne le relai aux sondeurs / techniciens. Il leur présente le site ainsi que les risques qui peuvent survenir et les moyens mis en œuvre pour les éviter.

Ce n'est qu'après l'ensemble de ces démarches que l'intervention peut commencer dans les meilleures conditions.

Les moyens

Concernant la Géotechnique, les interventions de terrain sont, pour la plupart, réalisées par le Pôle Sondage du groupe. Il s'agit d'un service interne qui effectue les prestations de terrain : il intervient avec ses propres machines et son propre personnel.

Les moyens affectés à l'agence de Normandie sont les suivants :

- 1 sondeuse de faible puissance équipée d'une tarière et d'un pénétromètre dynamique ;
- 3 sondeuses de moyenne puissance capables de réaliser des forages de 60 à 150 mm de diamètre, des prélèvements d'échantillons, carottages et essais pressiométriques.

Chaque machine fonctionne grâce à une équipe de 2 sondeurs.

Ces moyens peuvent varier en fonction de la demande (machine supplémentaire, pénétromètre statique, etc.).

Concernant l'Environnement, d'autres moyens sont mobilisés auprès des entreprises extérieures : pelles mécaniques pour les essais MATSUO ou les prélèvements d'échantillons de sol pour la pollution, par exemple.

Enfin, l'agence de Normandie dispose également de son propre matériel :

- Tarières et pelles manuelles ;
- Tubes pour Essai Porchet ;
- Matériel de nivellement…

Prélèvements et essais in situ

Les principaux prélèvements et essais qui peuvent être réalisés sur site sont les suivants :

- Pour la Géotechnique :
  - Prélèvements d'échantillons remaniés ;
  - Prélèvements d'échantillons intacts ;
  - Essais au pénétromètre dynamique ou statique ;
  - Essais pressiométriques.

- Pour l'Environnement :
  - Prélèvements de sol pour analyse Pollution ;
  - Prélèvements d'eau (surveillance piézométrique) ;
  - Essais Porchet ;
  - Essais MATSUO.

1.4.3. Le laboratoire

Pour ce qui est des analyses de sol ou d'eau pour la pollution, elles sont sous-traitées à un laboratoire extérieur à l'entreprise.

Concernant la Géotechnique, l'ensemble des essais peut être réalisé par Ginger CEBTP. L'agence de Normandie dispose de 2 laboratoires (un à Rouen et un à Caen), capables de répondre aux demandes en termes d'essais d'identification (teneur en eau, VBS, limites d'Atterberg, granulométrie par tamisage / par sédimentation, masses volumiques, etc.) ou encore en termes d'essais d'aptitude au traitement.

Quant aux essais mécaniques (essais de cisaillement à la boîte / triaxiaux, essais oedométriques, etc.), ils sont traités par le laboratoire de Ginger CEBTP situé à Elancourt (78).

L'ensemble des essais réalisés répond aux protocoles définis par les normes correspondantes.

1.4.4. Le rapport

Une fois les investigations et les essais réalisés, on peut alors les exploiter pour rédiger le rapport, synthèse de l'étude, à remettre au client.

Dépouillement des investigations et des essais (éventuellement)

Lorsque qu'il y en a, les résultats des investigations et des essais étant bruts, il faut d'abord les exploiter.

Bien souvent, ce sont les techniciens de l'agence qui dépouillent les essais et les remettent, au propre, aux chargés d'affaires.

Pour se faire, un logiciel interne de Ginger CEBTP, GeoWin, est disponible. Il permet de dépouiller les résultats directement (moyennant quelques adaptations de l'opérateur) et la mise en page se fait automatiquement.

Pour ce qui est des résultats d'analyses de pollution en laboratoire extérieur, les résultats arrivent sous forme de tableau de synthèse de l'ensemble des valeurs.

La rédaction du rapport

Le chargé d'affaire récupère ensuite les résultats des investigations et des essais pour les intégrer à son rapport d'étude. Ces résultats sont alors exploités pour répondre aux objectifs de la mission définie.

Chaque rapport fait l'objet d'une relecture interne par un autre chargé d'affaire habilité (en fonction de la complexité du projet). Ce système permet d'assurer le suivi qualité des études.

2. Interactions entre missions Géotechnique et Environnementale

Afin d'illustrer au mieux les interactions qui peuvent survenir entre les services géotechnique et environnemental, nous développerons ici 3 exemples représentatifs des différents types de projet auxquels ces services peuvent être confrontés :

- Un projet de construction de maison individuelle ;
- Un projet d'extension en milieu industriel ;
- Un projet de contournement routier.

2.1. Construction d'un pavillon : Etudes de sol et d'infiltration

2.1.1. Présentation du contexte

Depuis plusieurs années maintenant, les constructions de maisons individuelles sont soumises à de nouvelles exigences :

- L'infiltration des eaux pluviales sur la parcelle du projet est rendue obligatoire par de nombreuses collectivités territoriales. Il s'agit de compenser l'imperméabilisation engendrée par la construction en mettant en place des tranchées drainantes ou des bassins d'infiltration ;
- L'étude géotechnique de conception phase avant-projet (G2 AVP) est devenue systématique afin de pouvoir assurer son bien. En effet, les experts en assurance se sont rendu compte qu'un grand nombre de sinistres était dû à des risques géotechniques mal ou non anticipés.

Face à ces dispositions, l'Agence Normandie est donc amenée à intervenir pour des missions couplées, dont nous allons développer ici un exemple.

Le projet étudié porte sur la construction d'un logement individuel à Saint-Pierre-lès-Elbeuf (76). Dans ce cadre, le propriétaire de la parcelle nous a mandatés pour réaliser :

- Une étude géotechnique préalable phase Principes Généraux de Construction (G1 PGC) ;
- Une étude d'infiltration des eaux pluviales.

2.1.2. Préparation du chantier

Définition du programme

Pour ce type d'ouvrage et à ce stade du projet, les investigations du sol peuvent uniquement reposer sur la réalisation de sondages à la tarière et d'essais au pénétromètre dynamique.

Les sondages à la tarière permettent d'identifier la lithologie des terrains en présence. Pour un pavillon, ils sont descendus jusqu'à 5 m, ce qui est dans la majorité des cas suffisant (semelles superficielles). Leur quantité dépend de la surface d'emprise de l'ouvrage : pour ce type de projet, on en réalise en général 2 à 3.

Les essais au pénétromètre dynamique fournissent une idée sur la résistance du sol.

Le principe du pénétromètre dynamique est détaillé en annexe 4.

Cet essai, non exploitable pour le dimensionnement géotechnique, permet néanmoins d'avoir une première approche sur la résistance du sol en fonction de la profondeur.

De la même manière que pour les sondages à la tarière, la quantité d'essais au pénétromètre dynamique à réaliser va dépendre de la surface de l'ouvrage. Pour un pavillon classique, on en effectue bien souvent 4 à 5 sur l'emprise du futur bâtiment.

Enfin, les essais relatifs à l'étude d'infiltration des eaux pluviales réalisés pour ce projet sont des essais Porchet. Ces essais permettent de déterminer la perméabilité des couches de surfaces (jusqu'à 0,50 m de profondeur environ), ce qui est suffisant pour dimensionner l'ouvrage de gestion des eaux pluviales d'un pavillon.

DICT

Elle est obligatoire dès lors que les sondages descendent à plus de 0,80 m de profondeur.
L'entreprise intervenante est tenue de rédiger des DICT et de les envoyer aux différents concessionnaires concernés.
La parcelle appartenant à un particulier, l'implantation des réseaux va surtout être fournie par le propriétaire auquel on demande bien souvent de signer une décharge.

Lorsqu'il y a intervention simultanée des deux services, la DICT peut être commune.

2.1.3. Intervention sur terrain

Afin d'optimiser le temps de travail des équipes mais également pour simplifier l'organisation du client tout comme celle de l'Agence, les interventions géotechnique et environnementale vont avoir lieu le même jour.

De plus, ceci permet aussi l'entraide entre les 2 équipes : par exemple, si les forages manuels pour les essais Porchet sont contraignants à réaliser, l'équipe de géotechnique peut les effectuer rapidement avec sa tarière mécanique.

Enfin, les reconnaissances géotechniques peuvent éventuellement détecter la présence d'eau à faible profondeur, ce qui rend impossible la réalisation d'un essai Porchet.

Ces essais sont réalisés de la manière suivante :

- Forage à la tarière de 150 mm, de cavités de 60 cm de profondeur ;
- Alimentation en eau continue du sondage en vue d'une saturation du sol sur une durée suffisante, par un système d'alimentation à niveau constant (hauteur d'eau maintenue à 160 mm dans le sondage) ;
- Mesure du volume d'eau infiltré pendant une durée minimale de 10 mn suite à cette saturation.

2.1.4. Interprétation des essais

Dans les 2 cas (géotechnique et environnement) et jusqu'à des profondeurs différentes, on devra fournir un faciès géologique du sol investigué.

Environnement

Les essais réalisés vont permettre de calculer la perméabilité des couches de sol superficielles (voir détail en annexe 5).

Géotechnique

En plus de la lithologie du site fournie par les sondages à la tarière, les résultats des essais au pénétromètre dynamique aboutissent à des courbes donnant la résistance de pointe q_d en fonction de la profondeur.

A ce stade de la mission, il est important que les 2 services communiquent afin de s'assurer de la corrélation de leurs résultats, notamment en ce qui concerne les couches lithologiques et la présence d'eau.

L'unicité des rendus doit être de mise afin de crédibiliser le travail vis-à-vis du client mais également afin de garantir un suivi qualité. L'interaction des 2 entités est alors une force.

2.1.5. Rédaction des rapports

Les rapports vont également présenter des informations similaires dont il faudra assurer l'homogénéité. Ceci est valable notamment pour les données suivantes :

- Situation du projet ;
- Nature du terrain et de l'ouvrage à construire ;
- Géologie du site (avant investigations, d'après le Bureau de Recherche Géologique et Minière 'BRGM') ;
- Risques naturels (cavités et mouvements de terrain, inondations, retrait/gonflement des argiles, sismicité).

La concertation des 2 services permet également un gain de temps : partage des recherches et transmission des informations d'un service à l'autre.

Pour le reste du rapport, il doit être conforme aux objectifs de la mission vendue.

Environnement

L'étude d'infiltration des eaux pluviales va dépendre du département dans lequel le projet va voir le jour. En Seine Maritime, les objectifs à atteindre quantitativement sont :

- Infiltrer l'équivalent du volume décennal ruisselé le plus défavorable, si la perméabilité des sols le permet ($K > 1.10^{-6}$ m/s) ;
- Assurer la vidange du volume de stockage des eaux pluviales en moins de deux jours pour un événement centennal le plus défavorable.

Dans le cadre de ce projet, pour une surface imperméabilisée de 198 m², le dimensionnement de la tranchée d'infiltration amène à un volume géométrique de 10 m^3 réparti sur 10 m de longueur.

Le détail du dimensionnement est fourni en annexe 5.

On vérifie enfin que la surface disponible sur la parcelle est suffisante pour y disposer un linéaire total de tranchée de 10 m.

Géotechnique

Le rapport Géotechnique d'une mission G1 PGC est limité aux éléments suivants :

- Synthèse des résultats des sondages réalisés à la tarière : description des horizons rencontrés (nature géologique, profondeur, épaisseur) ;
- Synthèse des résultats des essais réalisés au pénétromètre dynamique : fourchette pour les valeurs de la résistance de pointe q_d en fonction des formations (profondeur, épaisseur, q_d) ;
- Interprétation des résultats : profondeur d'assise des fondations préconisée, type de fondation (superficielles, profondes, semi-profondes…) ;
- En fonction des objectifs définis au contrat, des préconisations de mise en œuvre (dallage sur terre-plein, réalisation des terrassements) peuvent être fournies.

A ce stade du projet, aucune ébauche dimensionnelle des fondations ne peut être fournie.

2.1.6. Conclusion

Finalement, on retient de cet exemple (étude pavillonnaire) que la mission géotechnique G1 PGC et l'étude d'infiltration des eaux pluviales peuvent avoir lieu en même temps, moyennant la prise en compte des interactions suivantes :

- Un programme défini en concertation afin d'optimiser le planning et les mobilisations humaines et matérielles ;
- Une intervention sur le chantier simultanée afin de favoriser l'entraide entre les équipes ou bien de mobiliser une seule et même équipe polyvalente ;
- Des études (interprétation des résultats et rapports) à la fois :
    - En interaction pour ce qui est des parties communes et de l'homogénéité des résultats (coupes géologiques notamment) ;
    - Et indépendantes en ce qui concerne les parties spécifiques à chaque domaine.

Une attention particulière doit être portée aux missions dès lors qu'elles sollicitent les deux services. Si les prestations couplées peuvent être un point fort, elles peuvent également présenter des points critiques (organisation et communication, cohérence, homogénéité des résultats…) pour lesquels chacun doit rester vigilant.

Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que l'étude d'infiltration des eaux pluviales peut influer sur l'essence même du projet. En effet, les surfaces d'infiltration nécessaires pour contrecarrer l'imperméabilisation peuvent s'avérer importantes dans un espace foncier limité et le projet peut s'en trouver modifié.
Il convient donc de la réaliser au maximum en amont de la phase Projet.

2.2. Extension industrielle : Fondations profondes et pollution de la nappe phréatique

2.2.1. Présentation du projet

Le site étudié se situe à proximité du Havre (76) dans une usine acheminant de l'ammoniac, de l'urée technique et de l'AdBlue (solution permettant de convertir 85 % des oxydes d'azote contenus dans les gaz d'échappement, en azote et en vapeur d'eau). Ces produits sont destinés à l'agriculture comme aux applications industrielles.

Le projet porte sur la réalisation des ouvrages suivants :

- Une colonne de régénération ;
- Une structure métallique support de tuyauteries ;
- Un rack de liaison.

Ces ouvrages seront situés en lieu et place de deux ouvrages existants à démolir.

Suite à un incident survenu en janvier 2009, la nappe superficielle a été contaminée en arsenic et en potassium à proximité du projet. Des mesures, réalisées en mai 2013 au droit de 3 piézomètres entourant le projet, ont montré que les teneurs en arsenic de l'eau ont fortement diminué. Cependant, les nouveaux résultats des essais sur des échantillons d'eau prélevés en janvier 2014 montrent des teneurs en arsenic très élevées aux abords du projet, supérieurs au seuil de l'arrêté préfectoral spécifique au site d'étude et aux valeurs de références.

Le contrat a été conclu pour 2 types de missions :

- Campagne de surveillance des eaux souterraines au droit de trois piézomètres ;
- Etude géotechnique d'avant-projet.

2.2.2. Préparation du chantier

Définition du programme

Compte tenu des sollicitations apportées aux fondations et de la qualité médiocre des sols jusqu'à une profondeur d'au moins 6.0 m, les fondations seront a priori de type profondes.

Les investigations géotechniques seront alors de 25,0 m de profondeur avec réalisation d'un essai pressiométrique tous les 2,0 m de profondeur. En effet, il faut assurer une reconnaissance jusqu'au moins 5,0 m sous la pointe des pieux. Par ailleurs, les essais pressiométriques permettent d'obtenir les valeurs de résistance valables pour le dimensionnement à l'Eurocode 7.

La localisation des sondages dépend de l'implantation du projet. On les place en général à proximité des appuis du futur ouvrage.

Par ailleurs, les prélèvements des eaux souterraines ont été réalisés dans les piézomètres déjà présents sur le site.
En effet, le client a imposé l'utilisation de ces piézomètres. Toutefois, cette contrainte peut s'avérer décisive car il se peut que les piézomètres ne soient pas réalisés en conformité avec les exigences de prélèvements de pollution. Par exemple, le crépinage peut ne pas être placé au bon endroit et il se peut qu'on ne capte pas que la nappe que l'on souhaite étudier.
Dans le cadre de ce projet, les piézomètres étaient globalement conformes aux besoins, mais ce n'est pas toujours le cas.

Enfin, compte tenu de l'incident survenu et des précédentes investigations ayant révélé des taux inhabituels d'arsenic, c'est uniquement cette substance qui sera recherchée dans les analyses des eaux en laboratoire.

Plan de prévention

Un plan de prévention général à l'usine existe afin de prendre en considération les risques dus à l'exploitation du site et à la co-activité avec d'autres entreprises. Il exige que le chargé d'affaires et les équipes intervenantes respectent le protocole suivant :

- Le chargé d'affaires doit participer au plan de prévention et à la visite d'ouverture du chantier afin de s'informer des risques spécifiques à l'intervention et à l'environnement de travail ;
- Ensuite, il doit informer et former les équipes exécutantes ;
- Par ailleurs, tout intervenant doit posséder une habilitation sécurité niveau 1 ou niveau 2 (formations spécifiques à validité limitée).

De plus, compte tenu de la pollution en arsenic présente sur le site, des mesures de sécurité et de protection de l'environnement spécifiques doivent être prises. Pour cela, un plan de prévention spécifique doit être rédigé par l'usine avec les suggestions de l'entreprise qui réalise les travaux.

Ce document a pour but de prévenir tout contact corporel direct et d'empêcher la pénétration à l'intérieur du corps par une voie quelconque des poussières et/ou substances arsenicales.

Il comporte le respect des éléments suivants :

- Nécessité d'une aptitude médicale pour chacun des intervenants, confirmant la non contre-indication à l'exposition d'arsenic. Ce certificat doit préciser le type de travaux, le contexte et la durée, il est valable 1 an ;
- Un suivi urinaire doit également être mis en place pour vérifier que les travailleurs n'ont pas été contaminés ;
- Le responsable travaux de l'usine remplit une « fiche d'exposition à une substance cancérogène, mutagène ou toxique pour la reproduction » qui sera conservée ;
- Les travailleurs doivent porter une combinaison spécifique jetable, des gants et un masque adaptés. Les éléments usagés sont stockés dans des récipients réservés à cet effet, selon qu'ils soient jetables ou non ;
- L'usine doit mettre à disposition un récipient à proximité des piézomètres pour le rejet des eaux. Elle prend également en charge la décontamination de la pompe de prélèvement par lavage à l'eau claire ;
- Les machines font l'objet d'un nettoyage entre chaque sondage et avant de quitter la zone de travail, afin d'éviter d'emmener de la terre contaminées à l'intérieur et à l'extérieur de l'usage ;
- Directement après l'exposition, les travailleurs doivent se doucher en insistant sur le visage, les cheveux, les mains et les ongles. Ils doivent également se laver la bouche.

2.2.3. Intervention sur terrain

Influence du critère environnemental sur les investigations géotechniques

Le plan de prévention spécifique mis en place exige le respect de certaines règles de sécurité (voir paragraphe ci-dessus). Ces règles, primordiales pour la sécurité des travailleurs, peuvent néanmoins s'avérer une contrainte lors de l'intervention sur le site.

Les sondages géotechniques et les essais pressiométriques ont donc dus être réalisés des conditions qui complexifient le travail des équipes (port d'une combinaison, nettoyage systématique des machines entre chaque sondage à grandes eaux).

Le principe de l'essai pressiométrique est détaillé en annexe 9.

Protocole de prélèvement des eaux souterraines

Les prélèvements sont réalisés sur la base de la norme FD X 31-615 de Décembre 2000 *« Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage »*.

Au préalable, le niveau des eaux souterraines et la hauteur d'eau sont relevés par rapport au niveau repère de l'ouvrage.
Dans un second temps, une purge de l'eau contenue dans le forage est effectuée selon un minimum de 3 fois le volume de l'eau dans le forage. Cette étape permet de ne pas prélever l'eau stagnant dans le piézomètre (qui s'est mise en équilibre avec l'air ambiant), mais de prélever l'eau telle qu'elle est présente dans la nappe.

Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un préleveur jetable. Afin de ne pas contaminer les échantillons d'eau, un préleveur jetable différent a été utilisé pour chaque piézomètre.

2.2.4. Interprétation des essais

Environnement

Les analyses réalisées en laboratoire vont permettre de comparer les teneurs en arsenic aux valeurs de références. En effet, dans le cadre d'un diagnostic, pour délimiter et/ou qualifier une pollution, le recours à des valeurs de comparaison, permettant de replacer dans leur contexte les valeurs mesurées ou calculées, est indispensable.

Les valeurs de référence utilisées pour cette étude sont définies en annexe 7.

Le tableau et le diagramme d'évolution des concentrations en arsenic entre les mois de janvier et mars 2014 sont joints en annexe 8.

Géotechnique

En plus de la lithologie du site fournie par les sondages et des enregistrements des paramètres, les résultats des essais au pressiomètre aboutissent à des courbes donnant, en fonction de la profondeur :

- La pression de fluage p_f ;
- La pression limite ple* ;
- Le module pressiométrique E ;
- Le rapport E / p_{le}^*.

Les coupes de sondages, les paramètres de forage et les résultats des essais pressiométriques, sont joints en annexe 9, où l'on explique également chacune des valeurs mesurées ou calculées.

Il faut savoir que les sondages considérés pour l'étude ont été réalisés en 2013, dans le cadre d'une autre mission géotechnique, à un autre endroit de l'usine. Compte tenu des contraintes d'intervention et des teneurs en arsenic élevées, de nouveaux sondages n'ont pu être effectués.

Même si ces résultats devraient a priori être proches de ceux qu'on aurait pu observer au droit du futur projet, ils sont toutefois à considérer avec précaution.

2.2.5. Rédaction des rapports

Environnement

Interprétation des résultats

Les résultats des mesures de mars 2014, mettent en évidence les points suivants :

- Les teneurs en arsenic relevées dans l'eau en PZ1 (7010 µg.L^{-}1) et en PZ12 (7200 µg.L^{-}1) sont supérieures à l'ensemble des valeurs seuils retenues, elles sont significatives d'une mauvaise qualité de l'eau ;
- La teneur en arsenic dans l'eau en PZB (12,2 µg.L^{-}1) est supérieure aux valeurs seuils de l'arrêté du 11/01/2007, pour les eaux destinées à la consommation humaine, elle est cependant inférieure au seuil des eaux brutes utilisées pour la production d'eau, la qualité de l'eau est alors médiocre.

Au vu du seuil en arsenic fixé pour les rejets journaliers aqueux de l'ensemble l'usine (50 µg.L^{-1}), les eaux analysées ne sont pas conformes à l'arrêté préfectoral spécifique au site d'étude.

Recommandations

Au vu des teneurs en arsenic observées en PZ1 et en PZ12, ainsi que des variations de concentration au cours du temps dans les différents ouvrages, il est recommandé de poursuivre la surveillance des eaux souterraines sur le site.

Quant à la réalisation du projet, les terres devant être excavées peuvent être contaminées en arsenic. Ainsi, il est nécessaire d'anticiper les contraintes (financière, planning, etc…) que le caractère non inerte des terres déblayées pourrait engendrer, le cas échéant, via des sondages et des analyses de sols qui permettraient de préciser le risque vis-à-vis du projet et les filières d'évacuation.

Dans le cadre de la réalisation de fondations profondes, il est nécessaire de prendre en compte la problématique de mise en contact des deux nappes (superficielle et profonde) lors de la réalisation des pieux et éventuellement du rideau de palplanche, de même que la problématique des déchets constitués par les boues de forage des pieux.
En cas de pompage des eaux contaminées, le traitement des eaux d'exhaure devra être prévu.

Des dispositions de sécurité propres à la problématique des sols contaminés devront être mises en œuvre pour la sécurité des travailleurs et de l'environnement, de même que pour éviter la dispersion de la contamination.

Ainsi, il est recommandé la réalisation d'un plan de gestion (PG), qui aura pour objet de définir les moyens de réhabilitation possibles en corrélation avec l'état de pollution des milieux et les voies d'exposition aux substances au regard des activités et des usages futurs.

Géotechnique

Drainage en phase chantier et rabattement de nappe

D'après les relevés (venues d'eau observées entre 0.4 et 0.9 m de profondeur), une purge des remblais sur 2.3 m de profondeur (après mise en place d'un rideau de palplanches) devraient recouper la nappe phréatique, ce qui nécessitera un pompage permanent en fond de fouille.

Ce pompage pourrait, par exemple, être réalisé dans des tranchées ou cunettes périphériques ou dans des puits remplis ou non de grave. Etant donnée la proximité d'avoisinants, un rabattement de nappe préalable par pointes filtrantes ou puits filtrants ne semble pas envisageable.

Le rejet de l'eau polluée en arsenic devra être effectué avec un traitement approprié.

Fondation de la structure

L'exploitation des sondages et des essais réalisés amène **aux caractéristiques mécaniques** suivantes :

Formation	Nature du sol	Prof. Base (m/TN)	Valeurs pressiométriques	
			p_l^* (MPa)	E_M (MPa)
n°1	Remblais	1.5 à 1.8	-	-
n°2	Argile vasarde grise	6.0 à 6.4	0.25	2.5
n°3	Sable gris vert compact	12.5 à 16.5	2.37	29.0
n°4	Sable gris vert peu compact	> 26.8	0.60	6.0

Compte tenu de l'hétérogénéité de la formation n°1, des faibles caractéristiques de la formation n°2 et des descentes de charge élevées de la structure, une solution de fondations superficielles, semi-profondes ou par radier ancrées dans ces formations ou dans les remblais de substitution n'apparait pas envisageable pour cet ouvrage du fait de tassements prévisibles totaux et différentiels jugés trop importants.
Pour cet ouvrage, on devra donc s'orienter vers une solution de fondations profondes sur pieux ancrés dans les sables compacts de la formation n°3.

Etant donné la présence de pollution en arsenic dans la nappe superficielle créée par l'horizon argileux de la formation n°2, il est recommandé d'isoler les premiers mètres de terrains par la mise en place d'un tubage ancré jusqu'au moins 3 m de profondeur dans cette formation argileuse. La profondeur d'ancrage dépendra de la profondeur de terrain pollué. Il faudra donc réaliser des prélèvements de terrain afin d'évaluer la dispersion de la pollution avec la profondeur. Le diamètre du tube sera supérieur au diamètre du pieu.

Compte tenu de la présence de la nappe et de terrains majoritairement sableux, les pieux seront réalisés selon une technique permettant une bonne tenue des parois des forages sur toute leur hauteur (foré à la boue, foré tubé, foré tarière creuse, vissé par exemple…) et compatible avec la pose d'un tubage traversant les terrains superficiels.

La proximité des ouvrages avoisinants conduit à rejeter toute solution de fondation par pieux de type battus.

Le détail de l'ébauche dimensionnelle des pieux est joint en annexe 10.

2.2.6. Propositions des entreprises exécutrices des pieux

Suite à l'étude géotechnique d'avant-projet, la consultation des entreprises a eu lieu. Une analyse des propositions faites dans le rapport géotechnique a amené aux conclusions et variantes suivantes :

- La mise en place d'un tube métallique par vibrage puis l'excavation des terres contenues à l'intérieur du tube sont contraignantes. En effet, ce dispositif nécessite de solidariser les tubes pour ne pas les remonter lors du forage (soudure) puis de les découper après réalisation des pieux pour araser. Ce protocole présente des inconvénients pour la sécurité du personnel.
  Par ailleurs, même s'il est attaché, il y a toujours un risque pour que le tube remonte lors du forage ;

- Les entreprises proposent donc, d'une part, d'augmenter l'étanchéité du rideau de palplanche en mettant en place des joints hydrogonflants dans les serrures des palplanches ;

- D'autre part, elles sont plusieurs à proposer une technique de pieux vissés moulés. Cette solution présente plusieurs avantages :
  - Très peu de déblais sont produits (300 à 400 L par pieu contre 7000 à 8000 L pour un pieu foré simple) ;
  - Technique par refoulement ce qui augmente la densité du sol et diminue donc les vides par lesquels l'eau pourraient s'écouler ;
  - Le béton est ensuite coulé sous pression et le sol n'est donc jamais décomprimé ;

- Enfin, compte tenu de la présence d'arsenic, les entreprises préconisent l'utilisation d'un béton de classe XA3 (forte agressivité chimique), conformément à la norme NF EN 206-1.

2.2.7. Conclusion

Cet exemple en milieu industriel a démontré qu'il existe des interactions entre étude de pollution et étude géotechnique au niveau :

- De la préparation du chantier, notamment avec la prise en compte des protocoles de sécurité (plan de prévention) engendrant des contraintes de planning et de mobilisations humaine (qualification spécifique) et matérielle (EPI spécifiques) ;
- **Des études, qui ne peuvent cependant pas avoir lieu en même temps :**
  - **Le diagnostic de pollution intervient en amont, afin de définir les potentiels risques à prendre en compte ;**
  - **L'étude géotechnique doit ensuite proposer des solutions adaptées aux contraintes environnementales.**

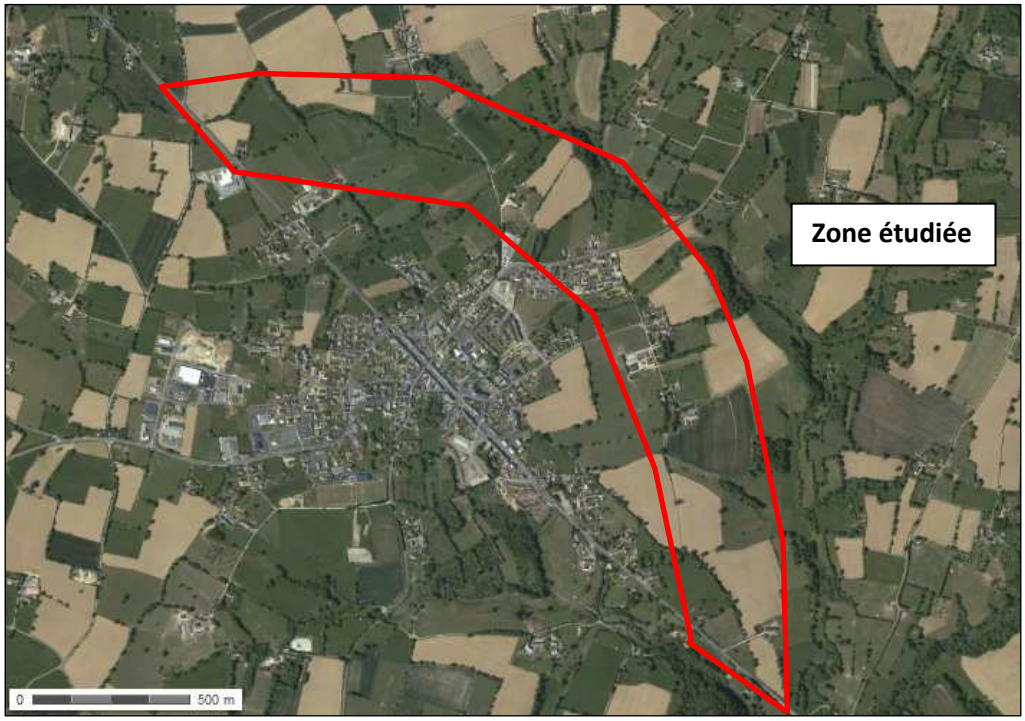
Ces interactions sont donc décisives pour le bon déroulé de chacune des missions.

Par ailleurs, les interventions en elles-mêmes, bien qu'elles reposent sur les mêmes contraintes (sécurité, qualification…), sont forcément indépendantes du fait qu'elles requièrent des compétences spécifiques à chaque domaine (protocole de prélèvement rigoureux et essais pressiométriques).

2.3. Contournement routier : stabilité de talus et zones humides

2.3.1. Présentation du projet

Le projet porte sur la réalisation du contournement de Sartilly (50) avec la création d'une section à 2x2 voies de largeur totale de 26 m, sur un linéaire de longueur totale de 2970 m.



Pour faciliter les études, le projet a été divisé en 12 tronçons, selon qu'ils soient en déblais, en remblais ou en profil rasant. Au sein de chacun des tronçons, plusieurs profils en travers significatifs ont été retenus, à intervalle régulier.

2.3.2. Description du site

Le site concerné par l'étude est recouvert de champs d'exploitation, topographiquement très variables.

D'après la carte géologique du « MONT-SAINT-MICHEL », le site serait constitué des formations suivantes, de haut en bas :

- Des limons de couverture ;
- Des alluvions modernes ;
- De l'arène granitique ;
- Du granite.

L'épaisseur de l'arène granitique peut être très variable d'un point à un autre car elle dépend du degré de fracturation de la roche, donc des efforts tectoniques subis ainsi que du contexte hydrogéologique, de sa densité, etc.

Le « ruisseau du Vieux Frévrier » est présent en partie Est du projet et rejoint le « ruisseau La Lerre » pour alimenter des retenues d'eau plus au sud. Le niveau du « ruisseau du Vieux Frévrier » est cependant beaucoup plus bas que ceux de la zone du projet. L'atlas régional dressé par la DIREN Basse-Normandie indique que le projet n'est pas situé, a priori, dans une zone de remontée de la nappe à un niveau pouvant présenter un risque pour les aménagements (supérieur à 5.0 m de profondeur).

2.3.3. Contexte de la mission

Ginger CEBTP a rejoint le projet en 2012 dans le cadre de l'avant-projet. A ce stade, il avait été réalisé :

- Une étude déblai remblai de l'ensemble des tronçons pour déterminer les quantités et les méthodes et pour dimensionner la chaussée ;
- Une mission d'avant-projet par tronçon (12 au total) ;
- Une synthèse géotechnique des investigations (mission G5).

Suite à cette première phase, l'enchaînement des missions géotechniques aurait voulu qu'une mission G2 PRO soit réalisée afin de justifier les stabilités des talus et de définir les méthodes de mise en œuvre. Une campagne d'investigations complémentaires aurait également pu être effectuée.

Cependant, cette mission n'a pas été réalisée puisque le client a sollicité de nouveau Ginger CEBTP au stade où l'entreprise exécutrice des travaux avait déjà été définie. Le contournement n'était donc plus au stade Projet mais au stade Exécution phase Etude.

Il s'agit donc d'une mission Supervision géotechnique d'Exécution (G4 Phase Etude) qui a pour objectifs :

- La justification de la stabilité des talus ;
- La modélisation des bèches et redans éventuels ;
- Les préconisations de mise en œuvre (stabilité en phase travaux également).

L'ensemble de ces calculs sera réalisé à l'aide du logiciel TALREN.

Contractuellement, compte tenu de l'avancement du projet, il s'agit d'une mission phase Exécution. Mais si l'on tient compte du fait qu'il n'y a pas eu d'étude géotechnique en phase Projet, cette mission G4 Phase Etude doit également pallier à l'absence de mission G2 PRO.

2.3.4. Prise en compte du Dossier Loi sur l'Eau

Le projet est soumis à autorisation au titre des rubriques 2.1.5.0, 3.1.2.0, 3.1.3.0 et 3.3.1.0 de la nomenclature du Code de l'Environnement, conformément à l'annexe 18.

Il est à noter que dans le cadre de la conception de ce projet, le Maître d'Ouvrage a choisi de mettre en œuvre une démarche spécifique où les préoccupations environnementales ont été intégrées très en amont.

La notice d'Incidences, réalisée par un autre bureau d'études, expose les éléments évoqués ci-après.

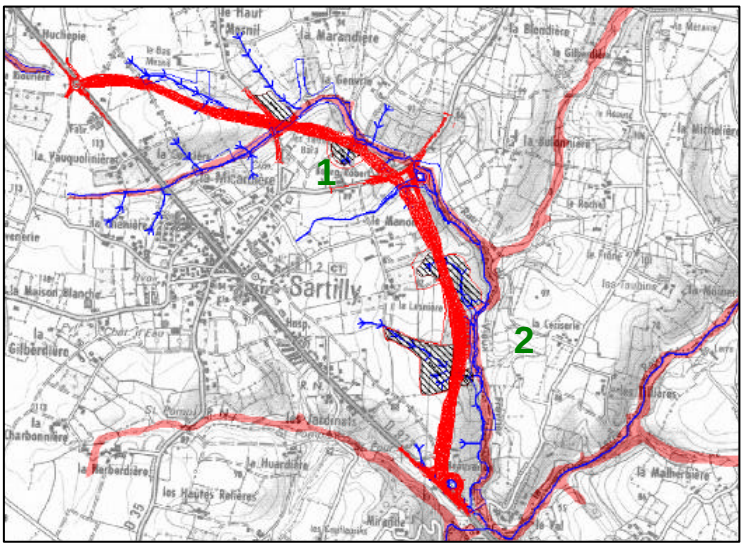
En effet, une analyse de l'état initial du site a permis de faire ressortir plusieurs éléments à prendre en compte qui se sont traduits dans le calage du tracé par les orientations suivantes :

- La préservation du profil en long du ruisseau du Vieux Frévrier tel qu'à l'existant ;
- Limiter au maximum les impacts sur le patrimoine naturel, les zones humides ;
- Limiter la nuisance pour les riverains ;
- Augmenter le confort et la sécurité des usagers.

Cette démarche a donc permis de repérer très en amont les principales atteintes potentielles du projet sur l'environnement en général et les milieux aquatiques en particulier de telle manière à en minimiser les impacts en fonction des contraintes techniques, économiques, foncières, sociales et des nuisances générées par le projet.

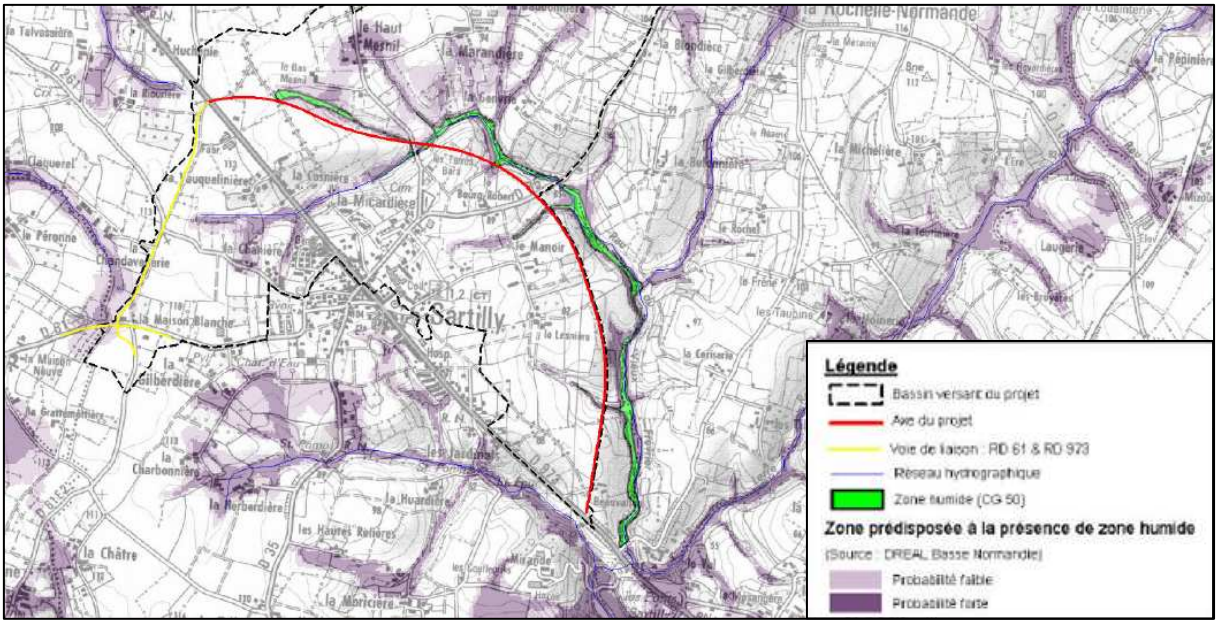
Parmi les dispositions prises pour éviter de perturber l'environnement, on trouve :

- La mise en place de deux bassins pour gérer les eaux pluviales de la plate-forme du nouveau tracé ;
- Les traversées du ruisseau du Vieux Frévrier et ses affluents seront assurées par des ouvrages cadres permettant l'écoulement en crue ainsi que la continuité écologique ;
- La collecte des ruissellements sera effectuée, sur l'ensemble des tronçons routiers du projet, par des fossés de part et d'autre de la voirie, dimensionnés pour transiter les écoulements issus d'une pluie décennale ;
- Les pentes au début du projet n'excédent pas 4% et s'adoucissent après la traversée du Vieux Frévrier en variant entre 1,5 à 1 %, malgré le relief en gouttière du secteur qui impose au projet de nombreux déblais et remblais.



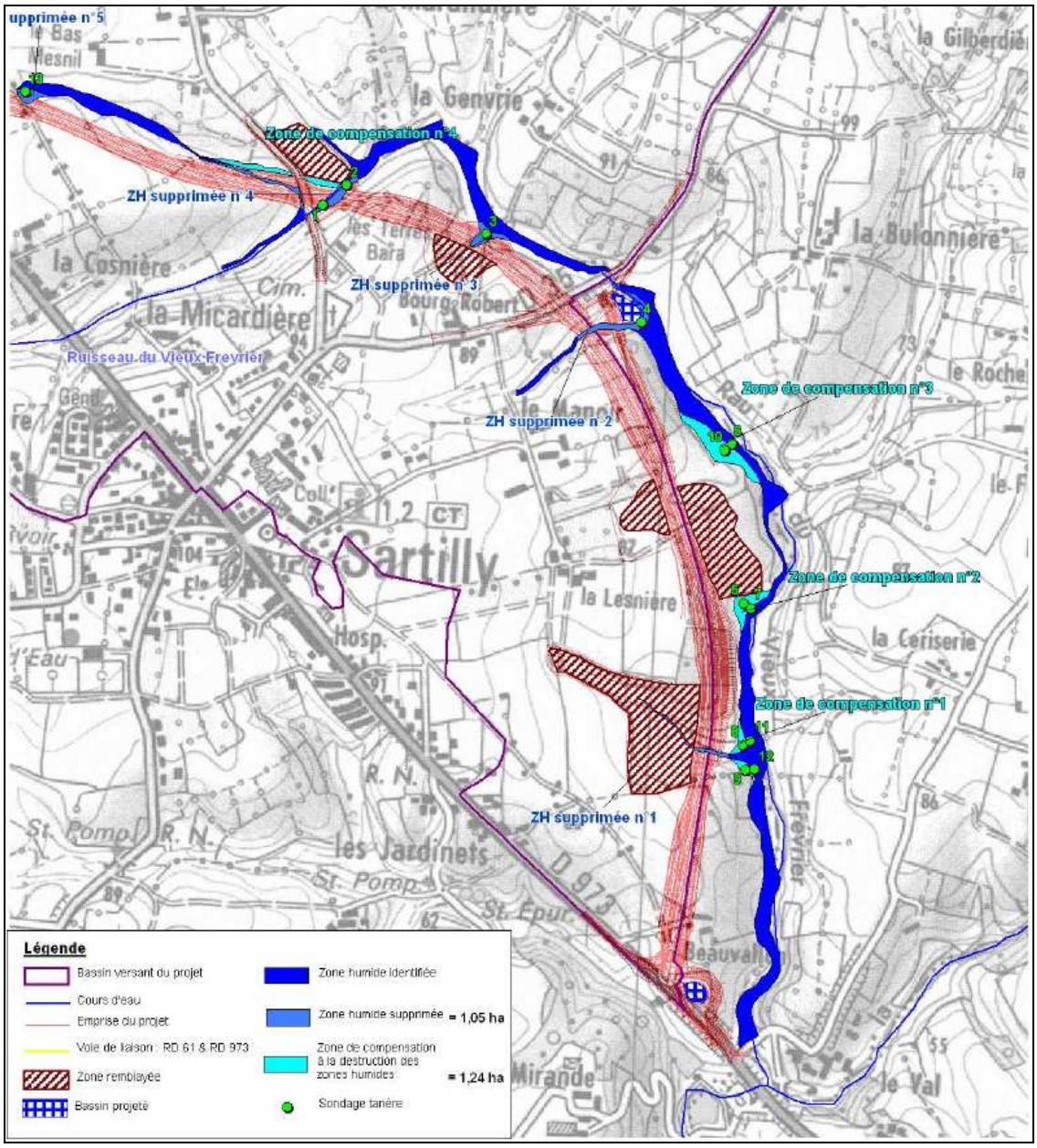
Zones inondables (notées 1 et 2)

D'après la notice d'Incidences réalisée par Ingétec, la hauteur de débordement du Vieux Frévrier pour l'évènement centennal le plus défavorable n'atteint pas l'emprise du projet (remblais compris) ; le projet ne réduit donc pas le champ d'expansion de la rivière (son écoulement n'est pas modifié).



La figure de recensement ci-dessus montre que de nombreuses zones humides sont traversées par le projet.
Celui-ci provoque le remblaiement de 1.05 ha de zones humides.

Le Maître d'Ouvrage entend apporter les mesures compensatoires liées à la destruction de zones humides, via une maîtrise foncière des terrains et une gestion écologique à long terme.
Les mesures compensatoires concernent des créations de zones humides pour une surface de 1.24 ha soit 118 % de surfaces recréées par rapport aux zones humides remblayées.



Plan des zones humides créées

On peut constater sur la figure ci-dessus mais également sur les coupes jointes en annexe 25 que les zones humides créées se trouvent à proximité immédiate du tracé du projet routier. On peut donc imaginer l'interaction directement présente entre les études Environnementales et les études Géotechniques sur ce type de projet.

En effet, la présence de zones humides non modifiables (compensation réglementaire et espace foncier limité) va restreindre les adaptations envisageables à la géométrie des talus. Leur emprise n'étant pas flexible, la pente des talus est imposée et la stabilité doit alors être assurée par d'autres moyens.

2.3.5. Etude Géotechnique d'Exécution phase Etude (G4)

Compte tenu de l'étude environnementale préalable, on a pu voir que certaines contraintes se sont dégagées :

- Contrainte environnementale : zones humides de compensation à respecter ;
- Contrainte géométrique : espace foncier limité.

Il a donc fallu répondre au mieux à la mission en tenant compte de ces contraintes afin de garantir l'adéquation entre environnement et géotechnique.

D'un point de vue purement technique, la mission s'est déroulée de la manière suivante :

Définition des profils en travers à vérifier

Le choix est souvent porté vers :

- Les profils présentant les hauteurs de déblais ou de remblais les plus importantes ;
- Les profils présentant des particularités :
  - Mise en place d'un merlon en tête de talus ;
  - Contexte géologique défavorable (matériau peu cohérent par exemple) ;
  - Présence d'eau à proximité ou dans le talus.

Préparation des profils

Avant d'utiliser le logiciel TALREN, un travail amont est nécessaire :

- En fonction des sondages réalisés dans la zone du profil étudié, dessiner la géologie (profondeur des différentes couches) sur le profil en travers ;
- Repérer les coordonnées de tous les points du profil pour pouvoir le représenter sur TALREN.

Vérification de la stabilité des talus du profil à l'aide du logiciel TALREN

L'utilisation du logiciel passe par plusieurs étapes qui sont détaillées en annexe 26.

Le logiciel, après avoir entré les hypothèses, permet de calculer la valeur du coefficient de sécurité F_{min} le plus défavorable pour un profil donné.

Pour avoir $F_{min} > F_{lim}$ (=1.5 pour un talus définitif), on peut jouer sur :

- La géométrie du talus :
  - Adoucir la pente ;
  - Mettre en place une banquette en pied de talus ;
- Les caractéristiques du sol :
  - S'il s'agit d'un remblai, on peut éventuellement traiter le matériau ;
  - Sinon, on peut substituer un matériau médiocre par un autre de meilleure qualité.

Dans le cas du présent projet, on rappelle que la présence de zones humides à proximité des talus et l'espace foncier limité ne permet pas de modifier la géométrie du profil dans ces zones.

Ceci va donc directement conditionner les solutions à envisager qui sont alors de type traitement et/ou substitution de sol, afin de garantir le coefficient de sécurité avec des pentes supérieures à celles qui auraient pu être retenues avec une emprise foncière plus importante.

2.3.6. Conclusion

Conformément à cet exemple d'aménagement routier, l'étude environnementale, à savoir la constitution du Dossier Loi sur l'Eau, a toujours lieu bien en amont.

On ne parle pas alors d'interaction mais il existe néanmoins une action, unilatérale cette fois-ci : c'est-à-dire que seule l'étude environnementale va agir sur l'étude géotechnique (sans réciproque).

En effet, on a pu voir que pour ce type de projet, de grande ampleur, la prise en compte des contraintes environnementales est primordiale et va directement influencer les choix techniques retenus.

3. Bilan et schémas d'interactions

Sur l'appui des exemples évoqués, nous avons pu voir précédemment que les interactions entre études géotechniques et études environnementales ne peuvent pas être parfaitement résumées au moyen d'un seul et même schéma.

Néanmoins, on pourra retenir les généralités suivantes :

- Concernant les études environnementales de Dossier Loi sur l'Eau :
  - Elles ont toujours lieu en amont des études géotechniques ;
  - Elles peuvent influer sur le projet et donc sur les études géotechniques ;

- Les études environnementales d'infiltration des eaux pluviales sont toujours postérieures aux études de projet car elles peuvent en modifier l'essence.
  Pour autant, elles peuvent être simultanées à la G1 voire à la G2 AVP, ce qui est même préférable afin :
  - D'optimiser le planning et les mobilisations humaines et matérielles ;
  - De garantir la qualité des résultats obtenus avec une concertation et un partage des savoir-faire ;

- Les études environnementales de diagnostic pollution du sol / de l'eau peuvent être réalisées à plusieurs stades du projet :
  - Alors qu'aucun projet n'est défini, lors de la vente d'un terrain (il s'agit alors de missions de type LEVE : étude historique et documentaire et investigations) ;
  - En amont du lancement du projet, pour connaître les contraintes que la pollution éventuelle va générer sur le déroulement du projet (LEVE ou EVAL : étude historique et documentaire et investigations) ;
  - En parallèle à l'étude géotechnique d'avant-projet, nous avons pu voir que la préparation du chantier peut être menée dans la même optique et les investigations peuvent avoir lieu en même temps, mais les résultats de l'étude de pollution seront un élément essentiel aux conclusions géotechniques et doivent donc être connus auparavant (EVAL : étude historique et documentaire et investigations) ;
  - Enfin, la mission EVAL peut faire apparaître la nécessité de planifier la gestion des déchets (mission PG) puis de réaliser un suivi durant la phase d'exécution des travaux afin de contrôler la bonne pratique des entreprises exécutrices (mission CONT : investigations).

Finalement, on peut donc constater que, sauf cas spécifiques (optimisation des moyens mobilisés, contrôle et gestion en phase exécution), les missions d'ordre environnemental sont réalisées de préférence en amont afin d'anticiper au maximum les répercussions qu'elles vont avoir sur le projet.

Pour ce qui est des cas où les missions environnementale et géotechnique sont entièrement couplées, on retiendra les interactions et spécificités suivantes, à chaque étape de la mission :

- Etape Devis / Appel d'offre :
    - Interaction : la réponse peut être commune et l'aspect organisationnel (mobilisations matérielle et humaine) doit être validé après concertation des deux services. Il peut également y avoir une relation de sous-traitance entre les deux services ;
    - Spécificité : les normes cadrant chacune des prestations sont différentes et les objectifs des missions sont donc définis indépendamment. Pour ce qui est du chiffrage, il a lieu séparément, chacun sollicitant sa propre expérience ;
- Etape DICT : cette étape peut être traitée en pleine concertation. Une seule DICT pour les deux services est suffisante ;
- Etape Définition du programme d'investigations : elle est plutôt réalisée indépendamment, afin de répondre aux exigences propres à chacun des domaines.
  Ensuite, les programmes de chaque service peuvent être comparés pour savoir si certains sondages peuvent être mutualisés ;
- Etape Préparation du chantier : elle doit être faite dans la concertation afin d'optimiser au mieux le planning et les moyens engagés. Les contraintes communes doivent également être abordées et gérées ensemble ;
- Etape Intervention :
    - Interaction : si c'est possible, l'intervention doit avoir lieu le même jour afin de favoriser l'entraide des équipes ou bien même de n'engager qu'une seule et même équipe polyvalente (ceci dépend des qualifications nécessaires) ;
    - Spécificité : le matériel utilisé va être propre à chaque métier. De plus, les qualifications (protocoles de prélèvement, réalisation des essais) sont multiples et différentes en fonction du service concerné ;
- Etape Interprétation des résultats :
    - Interaction : certains résultats doivent être confrontés pour garantir une homogénéité du rendu (notamment les faciès géologiques) ;
    - Spécificité : les calculs et les synthèses sont propres à chaque métier ;
- Etape Etude, rédaction du rapport :
    - Interaction : l'homogénéité des parties communes aux deux rapports est indispensable et nécessite un partage entre les deux services. Par ailleurs, les résultats environnementaux pouvant influer sur les solutions géotechniques, la communication entre les deux chargés d'affaires est primordiale ;
    - Spécificité : les études de chacun des services présentent bien entendu des spécificités, puisqu'elles n'ont pas les mêmes objectifs.

Conclusion

L'objectif de ce PFE était d'étudier les interactions existant entre études géotechniques et études environnementales. Pour connaître le contexte où s'appliquent ces interactions, il a tout d'abord fallu définir un cadre :

- Cadre réglementaire avec les normes définissant chacune des missions géotechniques d'une part et environnementales d'autre part : ces normes permettent également de distinguer les limites de prestation ;
- Cadre organisationnel avec un déroulé de chaque mission qui s'organise selon plusieurs étapes clés : préparation du chantier, intervention, essais, interprétation des résultats et rédaction du rapport.
  Ces étapes sont ensuite plus ou moins peaufinées en fonction de l'adaptation au projet ;
- Cadre du projet en question : en effet, selon l'essence du projet, les niveaux d'interactions vont varier et être plus ou moins importants.

On a donc pu constater que s'il existe un schéma général avec des points d'interactions quasi-permanents, il faut néanmoins adapter des schémas spécifiques, en fonction du type de projet et du type de missions demandées. En effet, selon ces critères, l'enchaînement et les interactions entre géotechnique et environnement vont différer.

Et quand bien même les interactions peuvent être définies en fonction du type de projet, chaque projet étant unique, il demande une vigilance sur des éléments toujours différents (organisation de l'intervention, sécurité, objectifs, études…).

On retiendra donc finalement qu'il est préférable d'avoir une réflexion adaptée à chaque projet. Cette réflexion pourra être menée de grand en petit, c'est-à-dire :

- Définition des cadres réglementaire, organisationnel et projet ;
- En fonction du type de projet et des missions, définition de l'enchaînement privilégié entre environnement et géotechnique et des interactions possibles ;
- En fonction du projet en lui-même, prise en compte des particularités et du fil rouge à suivre.

Ce PFE a donc mené un travail de réflexion autour des schémas d'interactions à suivre entre études géotechniques et études environnementales. S'il est parvenu à définir des schémas types, il conviendra toutefois de les adapter au cas par cas, en fonction des projets où ont lieu ces interactions.

Bibliographie

Norme NF P 94-500 de novembre 2013 : Missions géotechniques – Classification et spécifications

Code de l'Environnement – Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Norme NF P 94-063 de juin 2011 : Contrôle de la qualité du compactage (Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante)

Norme NF P 94-110-1 de janvier 2000 : Essai pressiométrique Ménard

Dossier Loi sur l'Eau du contournement de Sartilly (50) réalisé par un autre bureau d'études

Fascicule n° 62 – Titre V de mai 2012 – Ministère de l'équipement, du logement et des transports : Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil

Norme NF P 94-262 de juillet 2012 : Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes

Norme NF EN 1997-1/NA de septembre 2006 : Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1: Règles générales (Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005)

Norme NF X 31-620 de juin 2011 : Prestations de services relatives aux sites et sols pollués

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine

Directives de qualité pour l'eau de boisson (2006) de l'Organisation Mondiale de la Santé

« Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines » (SEQ – eaux souterraines)

Norme FD X 31-615 de décembre 2000 : Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage

Annexes

Annexe n° 1 : Organigramme de l'agence Ginger CEBTP Normandie

(annule et remplace la version V4 du 08/01/2014)

Direction régionale GRAND NORD

Directeur Régional : Olivier JONQUOIS
Responsable Administratif et Financier : Philippe VANDAMME
Directeur Qualité & Sécurité : Valérie LEMAIRE
Animateur Qualité & Sécurité National : Sandrine AMARO
Responsable Métrologie National : Laurent FRASCA

Correspondant qualité : Laurent LAVAUD
Correspondant métrologie : Nicolas GALLET
Correspondant sécurité : Frédéric LEFEBVRE

Agence de NORMANDIE

Chef d'agence : Frédéric LEFEBVRE
Responsable Technique et Développement : Abdeljalil ZRI
Assistante : Mélanie MAHIEU
Accueil : Véronique FARCY

Service Essais - Contrôles - Route - Certification

Chef de laboratoire : IH. KHALDI

Assistante : J. GOODE

Chargés d'affaires
Nicolas GALLET
Mathieu PERIMONY

Animateur Régional de la marque NF BPE
Emmanuel DELATTRE

Techniciens Supérieurs
Hicham KHALDI
Nicolas LEROUX (1)

Techniciens
Samir BEKHEDDA
Cyrille VANDENBOSSCHE
Marc VERINE (1)

Auditeur/ Inspecteur NF-BPE
Emmanuel DELATTRE
Laurent LAVAUD

Auditeur/Inspecteur NF - CE Granulats
Laurent LAVAUD

Service Expertise - Pathologie

Animation Technique et Opérationnelle : E. DELATTRE

Assistante : J. GOODE

Chargés d'affaires
Sekoura AKROUF
Emmanuel DELATTRE

Chargés d'études
Bilel CHAOUALI

Techniciens Supérieurs
Alexandre HOT

Service Géotechnique

Animation Technique et Opérationnelle : JP. ESCUDIE et V. LEMARIEY (1)

Assistante : C. COLLAVET

Assitante commerciale : Céline BOSCARO

Ingénieur d'études confirmé : F. HERMAN

Chargés d'affaires
Jean-Philippe ESCUDIE
Emmanuel HUET
Virginie LEMARIEY (1)
Sylvia PASCOAL

Chargés d'études
Margot CAILLE
Thibault VOYEUX

Technicien Supérieur
Nicolas LEROUX (1)

Techniciens
Matthieu GADENNE
Florent RAOULX

Superviseur de Travaux
Thomas TORQUET

Service Expertises Environnementales - Cellule Environnement

Animation Technique et Opérationnelle : A. HALTZ

Assistante : C. COLLAVET

Assitante commerciale : Céline BOSCARO

Chargé d'affaires
Antoine HALTZ

Chargé d'études
Camille MOREL

Technicien
Matthieu GADENNE
Florent RAOULX

Pôle Sondage

Responsable de Production : Fabien SERIN
Conducteur de travaux : Claude DEWEER

Opérateurs Géotechniciens
Alexis BARRE
Lhoucine EL GHAZOUANI
Mohamed JAMAL
Yohann LABOURIER
Mohammed OUCHEOU

(1) : Basé sur le site de IFS

---------- lien fonctionnel

_____ lien hiérarchique

Annexe n° 2 : Feuille de route des investigations de terrain

CEBTP	**FICHE D'INSTRUCTIONS DE CHANTIER SONDAGE GEOTECHNIQUE**	ENREGISTREMENT	**E123**
		Version 3 – 03/10/2013	
		Processus : AFFAIRES	

Réf. DICT : ……

Réf. ARRETE DE VOIRIE : ……

I. DESIGNATION DE L'AFFAIRE

PROJET : …… **DOSSIER N° :**……

ADRESSE : ……

……

CLIENT : ……

INGENIEUR CHARGE DE L'AFFAIRE : …… **AGENCE :**……

☎ Bureau **:** …… ☎ Portable **:** ……

II. OBJECTIFS DE LA MISSION *(programme détaillé en page 2)*

Problème à mettre en évidence : ……

……

……

Contexte géologique prévisionnel : ……

……

III. IMPERATIFS D'EXECUTION

SOUHAIT : Semaine N°……

ATELIER demandé : ……

Durée estimée pour la mission

…….…… jours

DEBUT : Date impérative :……..

FIN : Date impérative : ……..……

CONTACT : **AVANT** intervention prévenir : ……..…… Tél. : ……

Au moins……..…**jours à l'avance**

☎ APPELS IMPERATIFS : ☐ Après 1er sondage ☐ Tous les jours ☐ Avant de partir

Ingénieur à contacter avant départ vers le chantier ☐ OUI ☐ NON

Pendant les travaux, en cas de problème prévenir : ……. Tél. : …….

CRITERES D'ARRET : ***Ne jamais s'arrêter sur une rechute marquée de résistance***

Par exemple. : Pressio : suite de x essais > x bars

Pénétro : refus, x coups/20 cm en dynamique, x bars sur x mètres en statique

……

Si profondeur > au programme, demander avis à : ……...……...

NIVEAUX D'EAU A RELEVER : ☐ Dans les sondages ☐ Dans les piézomètres

☐ Matin ☐ Soir

RESULTATS A FOURNIR : ☐ Fin de chantier ☐ Fin de semaine

IV. PROGRAMME *(voir besoins en consommables page 4)*

Sondage N°	*Type de sondage*	*Profondeur*	*Essai (type, profondeur)*	*Enregistrements**	*Echantillons*	*Equipements*

* : Type d'enregistrement du sondage et/ou des essais : P = paramètres S = pressios

Feuilles d'essai à utiliser : (nom et numéro d'identification de la feuille) : ……

Toute modification apportée dans le programme doit impérativement être décrite dans le tableau ci-dessus.

V. CONDITIONS DE CHANTIER *(Utiliser la Fiche de prévisite de chantier E126 au besoin)*

☐ ***Travaux de nuit***

ACCES : ……..……

……

Clefs chez : …… Tel : ……..

Adresse : ……..

ACCES SOUMIS A : ☐ Autorisation ☐ Arrêté municipal, préfectoral ☐ Autres restrictions ……

ACCES PREVOIR : ☐ Piste ☐ Rampes d'accès ☐ Tas, bloc à enlever ☐ Bastaings
☐ Démolition ☐ Grutage ☐ Barge ☐ Protection du sol

EXIGUITES : ☐ Passage H : ……..… L : ……..…. Hauteur travail : ……..…… Câble aérien : H/sol : ……..…..

ETAT DU TERRAIN : ……...

……

Traficabilité estimée en cas de pluies :……

VI. SANTE / SECURITE / ENVIRONNEMENT

Plan de prévention ☐ **ou PPSPS** ☐ **oui** ☐ (si oui, joindre le plan de prévention ou le PPSPS)

RESEAUX ENTERRES

1- ☐ DICT jointes au présent document (vérifier sa présence)
2- ☐ Présence d'un réseau à proximité (< 50 m) d'un point de sondage (☐ Electrique ☐ Gaz ☐ Fibre optique ☐ Eaux
☐ Autres (à préciser) : ……..…..)

Dans ce cas joindre obligatoirement:

3- ☐ Plan de positionnement des points sondages et du/des réseaux enterrés

ATTENTION !!!!

Dans le cas où la consigne n°2 est cochée, l'opérateur géotechnicien doit vérifier que le/les plans des points de sondage et du/des réseaux sont présents dans le dossier. Dans le cas contraire NE PAS INTERVENIR. Puis vérifier la présence claire des points de sondage (marquage, n° de sondage, jalonette)

En cas d'absence de l'un des trois éléments ci-dessus, appeler l'ingénieur chargé d'affaires

CONSIGNES PARTICULIERES SUR LA SECURITE ET LES CONDITIONS DE TRAVAIL SUR LE CHANTIER

……

……

RISQUES PRINCIPAUX LIES A L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL:

☐ Incendie/ explosion :…… ☐ Chute de hauteur :……...
☐ Chimique :…… ☐ Electrique :…… …… …… ……
☐ Circulation / déplacement :…… ☐ Manutention manuelle ou mécanisée : ……
☐ Nuisances (poussières, bruit, conditions climatiques…) :…… ☐ Travail sur l'eau ……
☐ Grutage :…… ☐ Autres :……

MESURES DE PREVENTION LIEES A L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

☐ EPI spécifiques :…… ☐ Matériel spécifique :……..……..…
☐ Formations sécurité spécifiques : …… ☐ Balisage :……..
☐ Déchets de chantier ……..…… ☐ Autres :……

SCHEMA D'ACCES

Joindre schéma ou plan pour trouver **rapidement** et accéder **facilement** sur le site, ou autres détails utiles

VII. REALISATION ET SUIVI DE CHANTIER

IMPLANTATION : ☐ Impérative comme plan ☐ Déjà faite sur le terrain ☐ A prévoir avec :…….

Toute modification d'implantation d'un sondage doit être faite avec l'accord de l'ingénieur chargé d'affaire ; l'implantation définitive sera relevée précisément et reportée sur les plans fournis ou sur un schéma.

NIVELLEMENT : ☐ Par topographe, géomètre, technicien ☐ Par le sondeur

Repère pris par le sondeur **:** (point NGF**,** tampon PTT, EDF, GDF, tampon d'assainissement, axe de route, seuil de porte, …)

……

AVANT-TROUS : ☐ Pelle/Pioche ☐ A la tarière à main ☐ Au marteau piqueur jusqu'à la profondeur de 1.30m

EAU DISPONIBLE A : …… m ☐ Citernage à prévoir Où ? Indiquer sur plan : ……..

COMPRESSEUR : ☐ Oui ☐ Non Puissance : ……..

APPROVISIONNEMENT EN CONSOMMABLES :

☐ Caisses à carottes ☐ PVC pour EI ☐ Equipement piézomètre ☐ Equipement inclinomètre ☐ Autre : …….

……..

IMPERATIFS, SUGGESTIONS DE SONDAGE, ECHANTILLONS :

(technique imposée, qualité du trou souhaitée en vue des essais prévus, de diagraphies éventuelles, d'instrumentations, etc.)

……..

……..

REBOUCHAGE : ☐ En tête ☐ Rebouchage sobranite ☐ Cimentation complète

La remise en état du site est impérative après travaux ; une fiche de dégât (PS-E508) est à établir au besoin

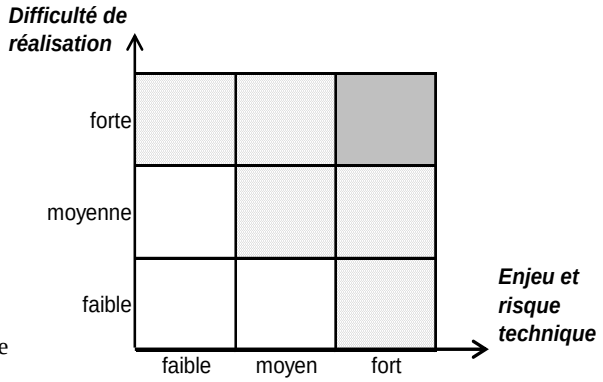
VIII. REVUE DES EXIGENCES

Cocher la case correspondant à la complexité de la mission

☐ **Mission de complexité faible :**
Revue des exigences et essais à valider par l'opérateur géotechnicien

▒ **Mission de complexité moyenne à forte :**
Revue des exigences et essais à valider par le conducteur de travaux

■ **Mission de complexité très forte à exceptionnelle :**
Revue des exigences et essais à valider par la direction du Pôle sondage



Rédacteur de la fiche	*Avant le départ en chantier*	*A la remise des résultats*
(chargé d'affaire)	*(validation Pôle sondage)*	*(chargé d'affaire)*
(Nom, Date et Signature)	**(Nom, Date et Signature)**	**(Nom, Date et Signature)**
Commentaires :	**Commentaires :**	**Commentaires :**
……	……	……..
……	……	……..
……	……	……..
……	……	……..

Annexe n° 3 : Fiche de quart d'heure de préparation de chantier

GINGER CEBTP	**SECURITE – SANTE – ENVIRONNEMENT** **¼ HEURE PREPARATION CHANTIER**	**NORMANDIE-E67 –V1 22/01/14** **Infra &Moyens - 1/1**

Libellé de l'intervention :		
N°de dossier :	Chargé d'affaire :	Préparation initiale ou complémentaire

Ce document est à renseigner par le chargé d'affaires et à présenter à tous les intervenants préalablement à l'intervention

Documents mis à disposition systématique des intervenants : Registre de Presqu'accidents + Fiche d'écart et/ou d'immobilisation E288 + Fiche d'Amélioration E33

N°	***Points de contrôles***	***Observations***
1	Fiche d'instruction de chantier / DICT	
2	Plan de prévention réalisé avec le client	
3	Analyses des risques spécifiques au chantier	
4	PPSPS spécifique au chantier	
5	Personnel d'appoint et sous-traitant	
6	Matériel (matériel interne ou location)	
7	Moyens de secours sur chantier (trousse à pharmacie, extincteurs, infirmerie…)	
8	Autres points particuliers	

Contrôles	Ci-dessus : nom/prénom de chaque intervenant	…… …… …… …… ……
	Ci-dessous : date et signature de chaque intervenant	…… …… …… …… ……

Ce document doit être présent sur chantier puis conservé dans le dossier

Annexe n° 4 : Principe du pénétromètre dynamique

Cet essai, non reconnu par les normes de dimensionnement géotechnique, permet néanmoins d'avoir une première approche sur la résistance du sol en fonction de la profondeur.

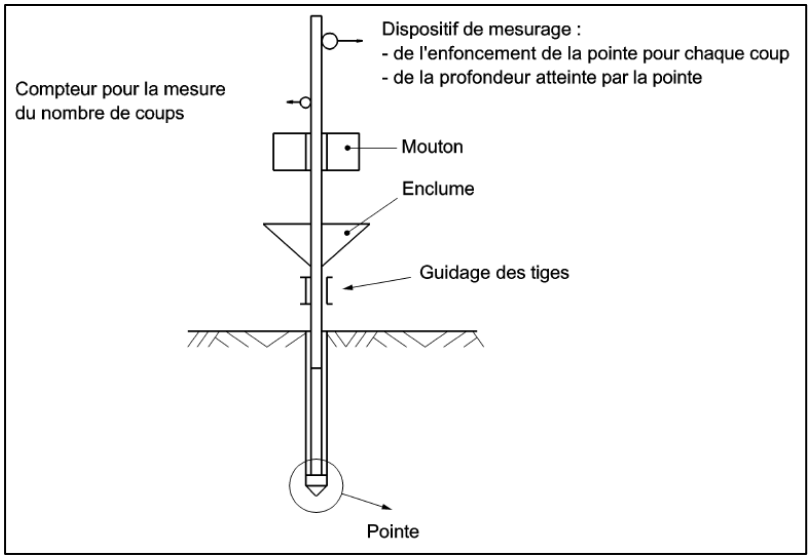

Dispositif de mesurage :
- de l'enfoncement de la pointe pour chaque coup
- de la profondeur atteinte par la pointe
Compteur pour la mesure du nombre de coups
Mouton
Enclume
Guidage des tiges
Pointe

Figure 2 - Schéma de principe d'un pénétromètre dynamique (d'après la norme NF P 94-063)

Le principe de cet appareil est de comptabiliser le nombre de coups nécessaires à enfoncer une tige de 20 cm dans le sol. En fonction de ce nombre de coups, on peut en déduire la résistance de pointe, notée q_d, calculée d'après la formule des Hollandais ci-dessous :

$$q_d = \frac{MgH}{Ae} \cdot \frac{M}{M + M'}$$

Où M est la masse du mouton,

M' la somme des masses du train de tiges, de la pointe, de l'enclume et de la tige guide,

H est la hauteur de chute,

e la pénétration moyenne par coup,

A est la section droite de la pointe

et g l'accélération de la pesanteur.

Annexe n° 5 : Détail de dimensionnement d'une tranchée d'infiltration des eaux pluviales

Toute d'abord, d'après les résultats des essais Porchet, le calcul du coefficient de perméabilité est donné par :

$$K = \frac{Q}{S}$$

avec Q le débit d'eau infiltré, tel que :

$$Q = \frac{Volume\ \ injecté}{durée\ \ de\ \ mesure}$$

et S la surface développée d'infiltration :

$$S = \pi\, D\, H + \frac{\pi\, D^2}{4}$$

Où D est le diamètre du forage où est réalisé l'essai
et H est la hauteur d'eau maintenue constante (160 mm)

L'étude d'infiltration des eaux pluviales va dépendre du département dans lequel le projet va voir le jour. En Seine Maritime, les objectifs à atteindre quantitativement sont :

- infiltrer l'équivalent du volume décennal ruisselé le plus défavorable, si la perméabilité des sols le permet ($K > 1.10^{-6}$ m/s) ;
- assurer la vidange du volume de stockage des eaux pluviales en moins de deux jours pour un événement centennal le plus défavorable.

Dans notre cas, l'étude d'infiltration indique que la perméabilité est relativement homogène sur l'ensemble du site, celle-ci est favorable à l'infiltration : **la perméabilité retenue est de l'ordre de 500 mm/h soit $1{,}4.10^{-4}$ m/s** (valeur maximale mesurable par l'essai Porchet).

Le volume de stockage V du système de gestion des eaux pluviales (dans notre cas il s'agit d'une tranchée d'infiltration) est donné comme suit :

$$V = V_{entrant} - V_{sortant}$$

Le volume entrant est déterminé à partir de la surface active du bassin versant (surface d'imperméabilisation de la parcelle) et de l'intensité de la pluie déterminée avec les coefficients de Montana, notés a et b.
Ces coefficients dépendent à la fois de la localisation du projet, de l'occurrence et de la durée de la pluie considérée. Dans le cas présent, il s'agit des coefficients de Montana pour la pluie la plus défavorable d'une occurrence de 100 ans sur la station de ROUEN-BOOS, donnés en annexe 6.

On a donc : $V_{entrant} = H \times S_a$

avec S_a, la surface active (en m²), ici S_a = 198 m²
H, la hauteur de pluie (en m), définie par : H (mm) = a x t^{1-b}
t, la durée de la pluie (en minutes)
a et b, les coefficients de Montana

Le volume sortant est déterminé par le débit de fuite (caractérisé ici par la perméabilité du sol) considéré comme constant pendant la phase de remplissage et la phase de vidange de l'ouvrage de rétention.

D'où : $V_{sortant} = K \times t \times S_{infiltration}$

avec K, la perméabilité du sol (en m/h)
t, la durée de la pluie (en heures)

On considère que les eaux pluviales sont propres, qu'un regard de décantation sera mis en place entre les descentes de gouttières et la tranchée d'infiltration et que l'entretien de ce regard sera régulier. La surface d'infiltration correspond alors à la moitié des surfaces des parois et de la base de la tranchée, afin de prendre en compte le phénomène de colmatage, soit :

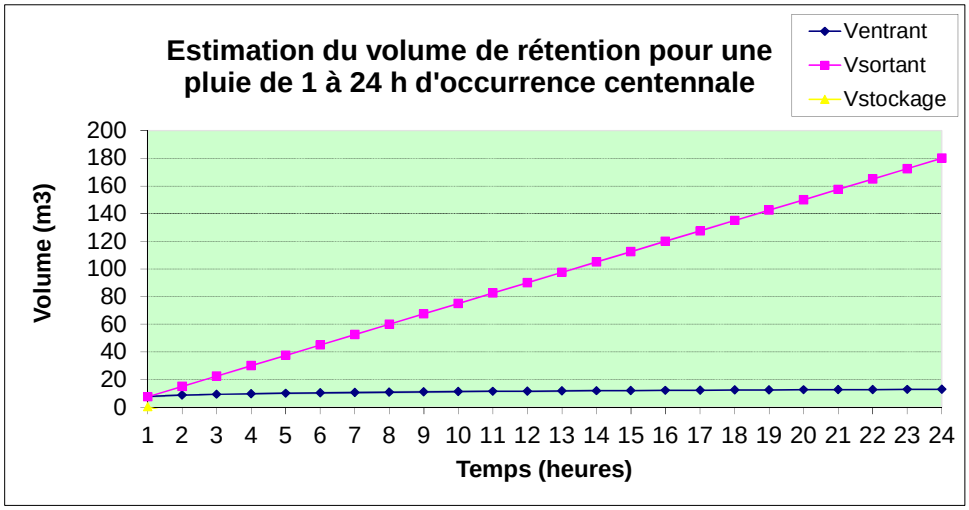
$$S_{infiltration} = \frac{1}{2}(S_b + S_p)$$

Pour calculer le volume de stockage, il faut donc considérer une certaine surface d'infiltration et en déduire ensuite la géométrie de la tranchée d'infiltration. On pose ici $S_{infiltration}$ = 15 m².

On trace alors les courbes du volume de stockage en fonction de la durée de la pluie et on obtient un volume de stockage maximum pour une durée donnée.

Les durées des pluies étudiées sont choisies en fonction des données pour les coefficients de Montana (fournis par Météo France) et de telle sorte qu'on obtienne des durées de pluie s'étalant sur une journée (ici de 6 minutes à 24 heures).

L'utilisation des coefficients de Montana pour une pluie de 1 heure à 24 heures d'occurrence centennale (a = 20,712 et b = 0,842) nous donne le graphe suivant :

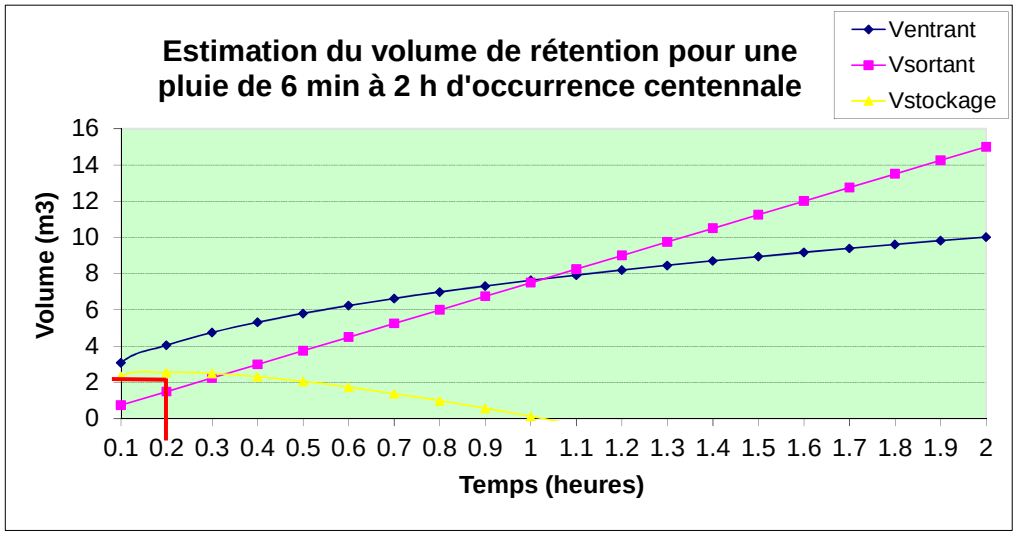

Estimation du volume de rétention pour une pluie de 1 à 24 h d'occurrence centennale
Ventrant
Vsortant
Vstockage
Volume (m3)
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
Temps (heures)

Les résultats obtenus sont :

t_c = 1 heure

$V_{100\ ans}$ = 0,33 m^3

L'utilisation des coefficients de Montana pour une pluie de 6 minutes à 2 heures d'occurrence centennale (a = 7,712 et b = 0,607) nous donne le graphe suivant :


Estimation du volume de rétention pour une pluie de 6 min à 2 h d'occurrence centennale
Ventrant
Vsortant
Vstockage
Volume (m3)
0 2 4 6 8 10 12 14 16
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2
Temps (heures)

Les résultats obtenus sont :

t_c = 0,2 heures (12 minutes)

V_{100ans} = 2,6 m^3

Par sécurité, on prend en compte la valeur la plus forte soit 2,6 m^3 pour une pluie de durée 0,2 heure (obtenue sur l'intervalle de pluie de 6 minutes à 2 heures).

Pour ce volume à stocker de 2,6 m^3, la surface d'infiltration nécessaire sera alors de **15 m²**.

Sachant que la tranchée sera **remplie d'un matériau dont la porosité sera au minimum de 30 %** (grave 20/40 par exemple), le **volume géométrique de la tranchée** devra être au minimum de **8,7 m^3** (2,6 / 0,3 = 8,7).

Ensuite, on définit que **la tranchée proposée** possèdera les caractéristiques suivantes **:**

- 2,0 m de large ;
- 0,6 m de profondeur dont 0,5 m de hauteur utile de stockage remplie d'un matériau de porosité minimum de 30 %.

Compte tenu des paramètres cités ci-dessus, **la section de la tranchée** sera alors de :

2,0 x 0,5 = 1,0 m²

La surface d'infiltration prise en hypothèse est de **15 m²**. Par conséquent, nous obtenons :

0,5 x (2 x L x 0,5 + 2,0 x L) = **15 m²**

d'où : **L = 10 ml**

Ce linéaire de tranchée est valable uniquement pour une surface parcellaire imperméabilisée considérée égale à 198 m².

Le **volume géométrique** de la tranchée correspondante est alors de **10 m^3**.

On vérifie finalement que la surface disponible sur la parcelle est suffisante pour y disposer un linéaire total de tranchée de 10 m.

Enfin, **le débit de vidange** ($Q = K \times S_{infiltration}$) étant de **2,1.10^{-3} m^3/s**, nous obtenons un temps de vidange de **0,4 heures**, ce qui est inférieur au seuil de 48h fixé par le département de la Seine-Maritime.

Annexe n° 6 : Coefficients de Montana pour les durées de pluie considérées

STATION DE ROUEN-BOOS (76)

PERIODE : 1957-2000

Durée de retour	Durée des pluies 1 heure à 24 heures	
	a	b
2 ans	6.057	0.757
5 ans	9.762	0.795
10 ans	12.310	0.811
20 ans	14.842	0.823
25 ans	15.630	0.826
30 ans	16.352	0.829
50 ans	18.196	0.835
75 ans	19.762	0.840
100 ans	20.712	0.842

Durée de retour en année	Durée des pluies 6 minutes à 2 heures	
	a	b
2	3,260	0,610
5	4,440	0,608
10	5,195	0,606
20	5,963	0,606
25	6,252	0,608
30	6,468	0,609
50	7,013	0,608
75	7,451	0,608
100	7,712	0,607

Annexe n° 7 : Valeurs de références utilisées pour déterminer la qualité des eaux souterraines

Les résultats d'analyse des eaux souterraines sont comparés aux valeurs de référence réglementaires de qualité des eaux définies par l'arrêté du 11 janvier 2007 fixant :

- Les valeurs limites et les valeurs références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées ;
- Les valeurs limites de qualité des eaux brutes de toute origine utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux de source conditionnées.

Ensuite, les teneurs mesurées sont également confrontées aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) provenant des directives de qualité pour l'eau de boisson (2006).

Par ailleurs, on utilise aussi les valeurs seuils établies lors du programme « Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines » (SEQ – eaux souterraines), fixant :

- Les valeurs limites de qualité des eaux destinées à usage d'irrigation ;
- Les valeurs limites d'aptitude à la biologie dans les cours d'eau ;
- Les valeurs limites des différentes classes de qualité d'une eau.

Enfin, dans le présent cas d'étude, un seuil limite en arsenic dans les rejets aqueux est fixé à 0,05 $mg.L^{-1}$ par jour, pour l'ensemble de l'usine, selon l'arrêté préfectoral spécifique au site d'étude.

Un tableau de comparaison des valeurs mesurées aux valeurs de référence est fourni en annexe 8.

Annexe n° 8 : Tableau et diagramme d'évolution des teneurs en arsenic de janvier à mars 2014

Paramètre	Unité	Arrêté du 11/01/2007		Valeurs guide OMS	SEQ - Eaux souterraines										Arrêté préfectoral	PZ1	PZ12	PZB
					Usage : irrigation		Aptitude à la biologie dans les cours d'eau				Qualité							
		Eaux destinées à la consommation humaine	Eaux brutes utilisées pour la production d'eau		Eau permettant l'irrigation des plantes très sensibles ou de tous les sols	Eau permettant l'irrigation des plantes tolérantes ou des sols alcalins ou neutres	Risque négligeable d'effets néfastes sur toutes les espèces	Risque d'effets chroniques (sublétaux) pour les espèces les plus sensibles, notamment pour les juvéniles	Risque d'effets chroniques (sublétaux) ; possible réduction de l'abondance ; prédominance d'espèces tolérantes	Risque d'effets létaux sur les espèces les plus sensibles ; diminution d'abondance	Très bonne	bonne	moyenne	médiocre	Seuil journalier de rejet aqueux pour toute l'usine			
Analyses en laboratoire																		
Arsenic	µg/l	10	100	10	100	2000	1	10	100	270	5	7,5	10	100	50	6780	4920	109
Arsenic	µg/l	10	100	10	100	2000	1	10	100	270	5	7,5	10	100	50	4760	37,1	648
Arsenic	µg/l	10	100	10	100	2000	1	10	100	270	5	7,5	10	100	50	7010	7200	12.2

Tableau 1 : Synthèse des résultats des campagnes de janvier, février et mars 2014 (respectivement de haut en bas)

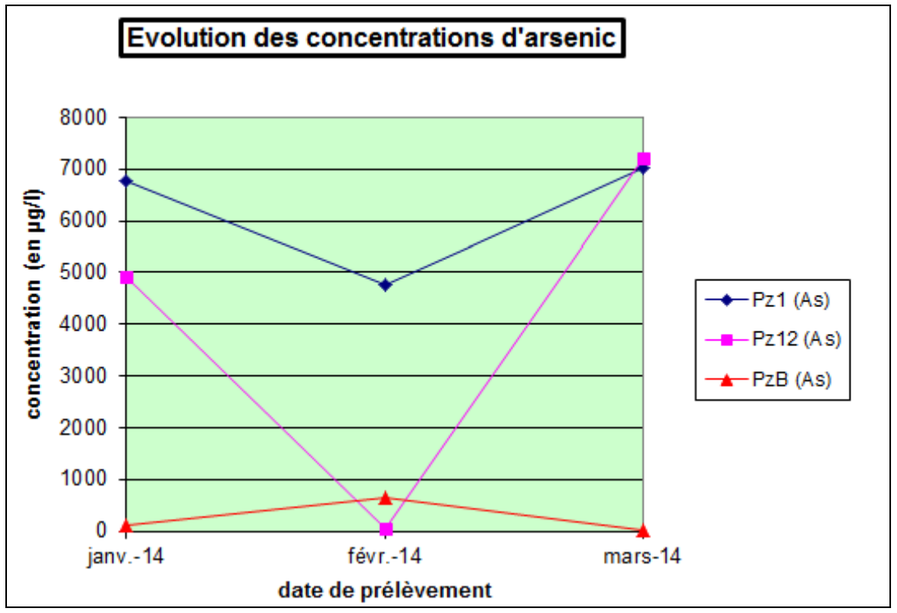


Figure 3 : Evolution des teneurs en arsenic dans les eaux souterraines

Annexe n° 9 : Principe du pressiomètre et coupes des sondages

Préalablement à la réalisation des essais pressiométriques, il faut effectuer un forage à la profondeur souhaitée. Les paramètres de forage peuvent être enregistrés afin d'obtenir des informations complémentaires sur la nature du sol, au moyen de :

- La vitesse d'avancement (VIA) en m/h : elle est généralement inversement proportionnelle à la résistance mécanique des sols traversés, élevée dans les horizons mous à lâches et faible dans les formations compactes. En la comparant avec la vitesse mesurée lors de l'étalonnage à vide, on peut déterminer si le sol présente ou non des passages décomprimés, altérés voir des vides ;
- La pression d'injection (PI) en bars : elle est globalement élevée dans les terrains peu perméables (argile, limon, roche non fracturées) et elle chute dans les formations plus perméables à fracturées (grave, sable) ;
- La pression sur outil (PO) en bars ;
- Le couple de rotation (CR) en bars ;
  Ces deux derniers paramètres sont maintenus quasi-constants dans la mesure du possible au cours des opérations de forage.

Une fois le forage obtenu, les essais pressiométriques peuvent avoir lieu.

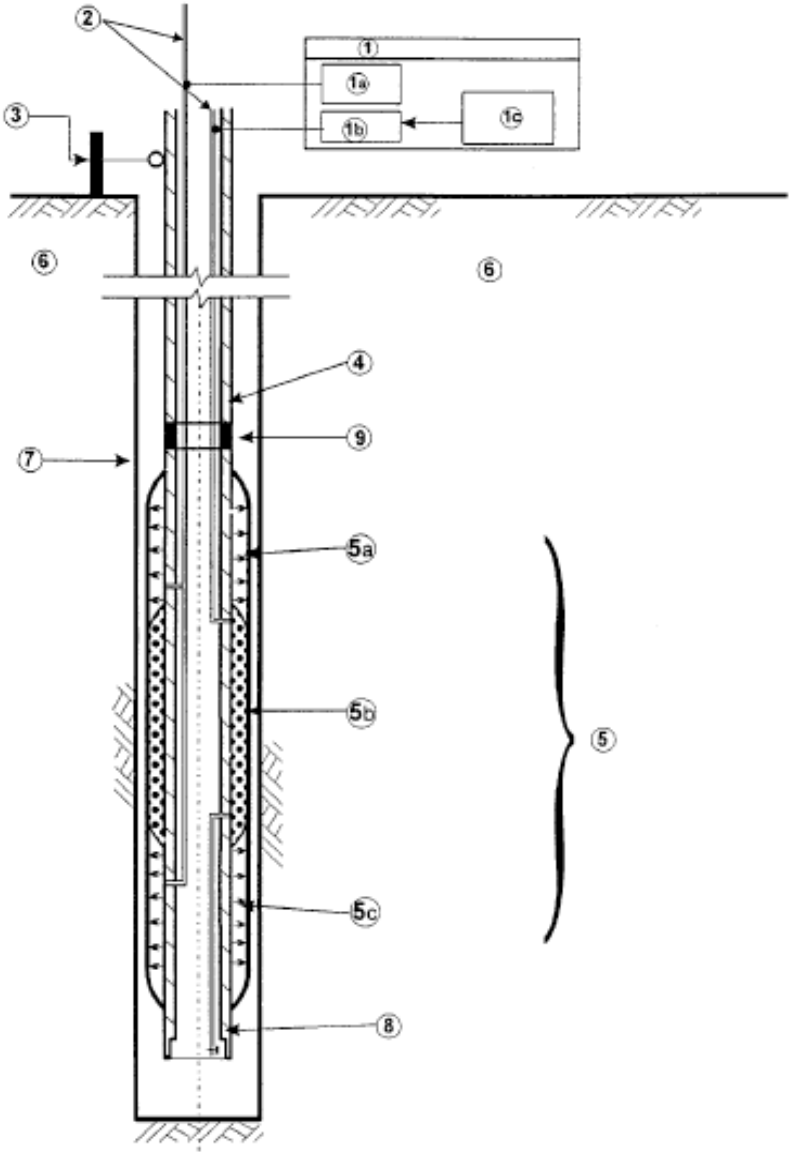
Ces essais sont réalisés, conformément à la Norme NF P 94-110-1 (essais pressiométrique Ménard), consistent à dilater dans le terrain une sonde cylindrique, selon le protocole suivant :

- Application, par paliers, d'une pression uniforme (50 bars au maximum) sur la paroi du forage par l'intermédiaire de la sonde ;
- Mesure de la variation du volume de la sonde, dans le temps (à 15, 30 et 60 secondes), en fonction de la pression qui lui est appliquée.

L'essai s'arrête, soit lorsque on a atteint la pression maximale de 50 bars, soit lorsqu'on a atteint la rupture du sol (le volume de la sonde alors augmente sensiblement pour de faibles variations de pression).

En profondeur, les essais sont effectués à intervalle régulier (75 cm au minimum) afin d'obtenir un profil représentatif du sol présent au niveau du forage.

Le pressiomètre est équipé d'un manomètre et d'une bouteille d'azote pour contrôler la pression et le volume. Il est conforme au schéma représenté à la page suivante.



Légende

1 Contrôleur pression volume CPV
1a Saisie, Stockage impression des données
1b Conditionneur indicateur
1c Système de mise en pression et d'injection
2 Tubes pour injection
3 Système de repérage de la profondeur
4 Tige de manœuvre
5 Sonde pressiométrique
5a Cellule de garde supérieure
5b Cellule centrale de mesure
5c Cellule de garde inférieure
6 Terrain
7 Forage pressiométrique
8 Âme métallique creuse
9 Raccord sonde — Tige de manœuvre

Figure 4 - Schéma d'un pressiomètre d'après la Norme NF P 94-110-1

A partir de chaque essai réalisé, on peut tracer la courbe pressiométrique qui donne l'évolution du volume V de la sonde en fonction de la pression p :

$$V = f(p)$$

où :

p désigne la pression appliquée au terrain par la sonde ;

V est le volume de liquide injecté dans la sonde et mesuré à la fin du palier de pression p (à 60 secondes).

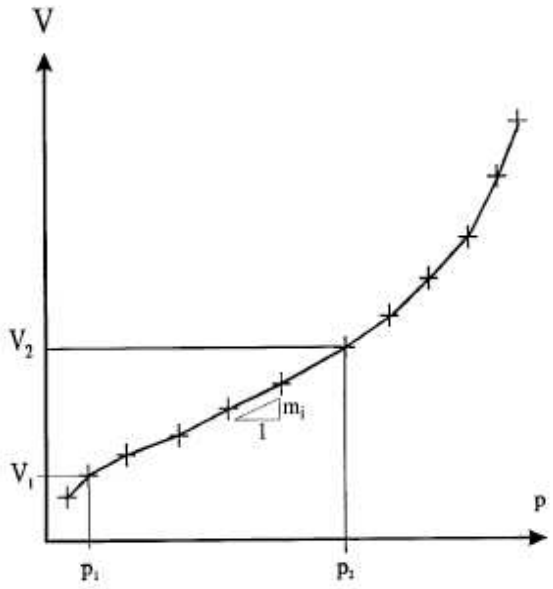


Figure 5 - Exemple de courbe pressiométrique d'après la norme NF 9 94-110-1

Les valeurs des pressions et des volumes relevés au cours de l'essai doivent être corrigées afin de tenir compte de :

- La pression due à la charge hydraulique p_h ;
- La résistance propre de la sonde p_e ;
- L'expansion propre de l'appareillage sous l'effet des augmentations de pression (dilatations des tubes et du système de mesure, etc.).

Ces corrections sont effectuées grâce à la connaissance des caractéristiques de la sonde et à l'étalonnage et au calibrage effectués.

La courbe pressiométrique permet d'obtenir les caractéristiques de suivantes, pour la profondeur à laquelle l'essai a été effectué :

- La pression de fluage p_f en MPa : pression déterminée sur le diagramme de fluage (p, $\Delta_{V60/30}$), avec $\Delta_{V60/30}$ la variation de volume injecté dans la sonde entre les temps t = 30 s et t = 60 s après le début du palier de pression p.

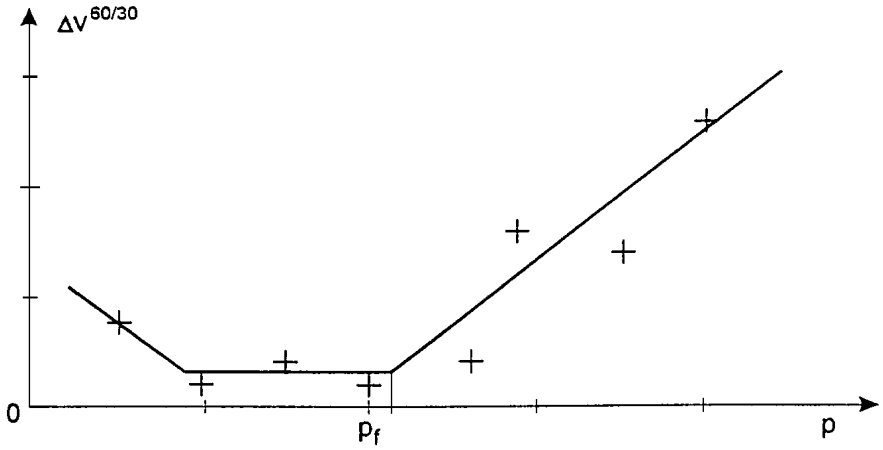


Figure 6 - Exemple de courbe de fluage pressiométrique d'après la norme NF P 94-110-1

p_f est l'abscisse de l'intersection des deux droites retenues pour schématiser le diagramme ;

- La pression limite p_{le}^* en MPa : pression correspondant, par convention, à celle qui entraîne le doublement du volume de la cavité :

$$V_l = V_s + 2 \cdot V_1$$

Où V_s est le volume initial de la cellule centrale de mesure de la sonde, calculé par exploitation de la courbe d'expansion (étalonnage).
Il peut arriver qu'au cours d'un essai, le volume de liquide injecté soit insuffisant, la pression limite est alors extrapolée ;

- Le module pressiométrique E en MPa : il s'agit du module de déformation calculé sur le segment (p_1V_1 ; p_2V_2) en admettant que le comportement du terrain est régi par une loi élastique linéaire. Il est calculé à partir de la formule :

$$E_M = 2(1+\upsilon) \cdot \left[V_s + \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \right] \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$

Où υ est le coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33 ;

- Le rapport E/ p_{le}^* sans unité : il renseigne, en fonction du type de sol, sur l'état de consolidation.

GINGER
CEBTP

annexe:

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE FPA

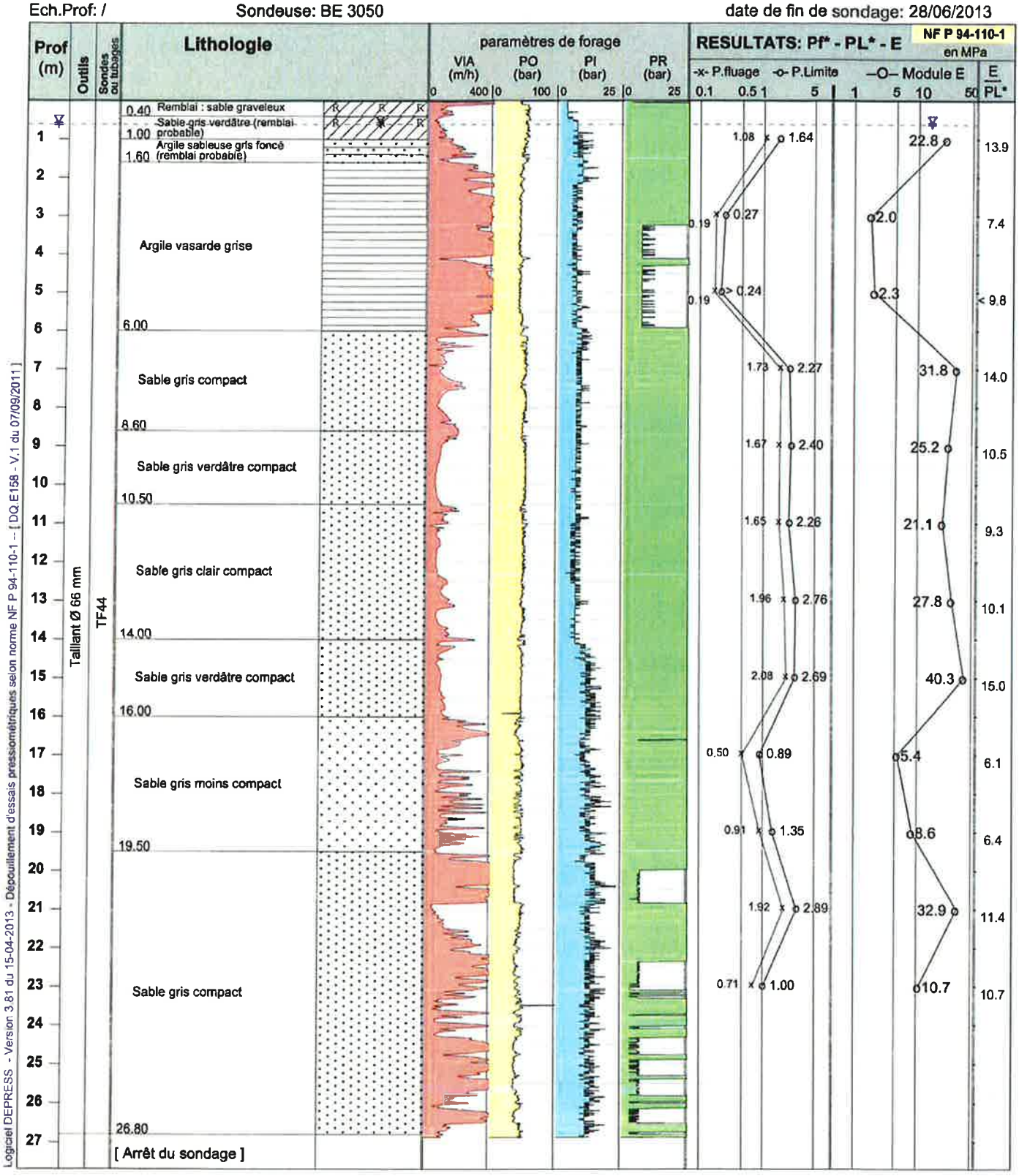
Chantier : GONFREVILLE L'ORCHER (76)
Réalisation de sondages pressiométriques

Client : YARA FRANCE

Dossier : DRN2.D.2096

INGENIERIE EUROPE GROUPE GINGER CEBTP

Ech.Prof: / Sondeuse: BE 3050 date de fin de sondage: 28/06/2013



Logiciel DEPRESS - Version 3.81 du 15-04-2013 - Dépouillement d'essais pressiométriques selon norme NF P 94-110-1 -- [DQ.E158 - V.1 du 07/09/2011]

Observations : /

Nappe: niveau d'eau à 0.6 m.
(à la date d'exécution du forage)

GINGER
CEBTP

annexe:

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE FPB

Chantier : GONFREVILLE L'ORCHER (76)
Réalisation de sondages pressiométriques

Client : YARA FRANCE

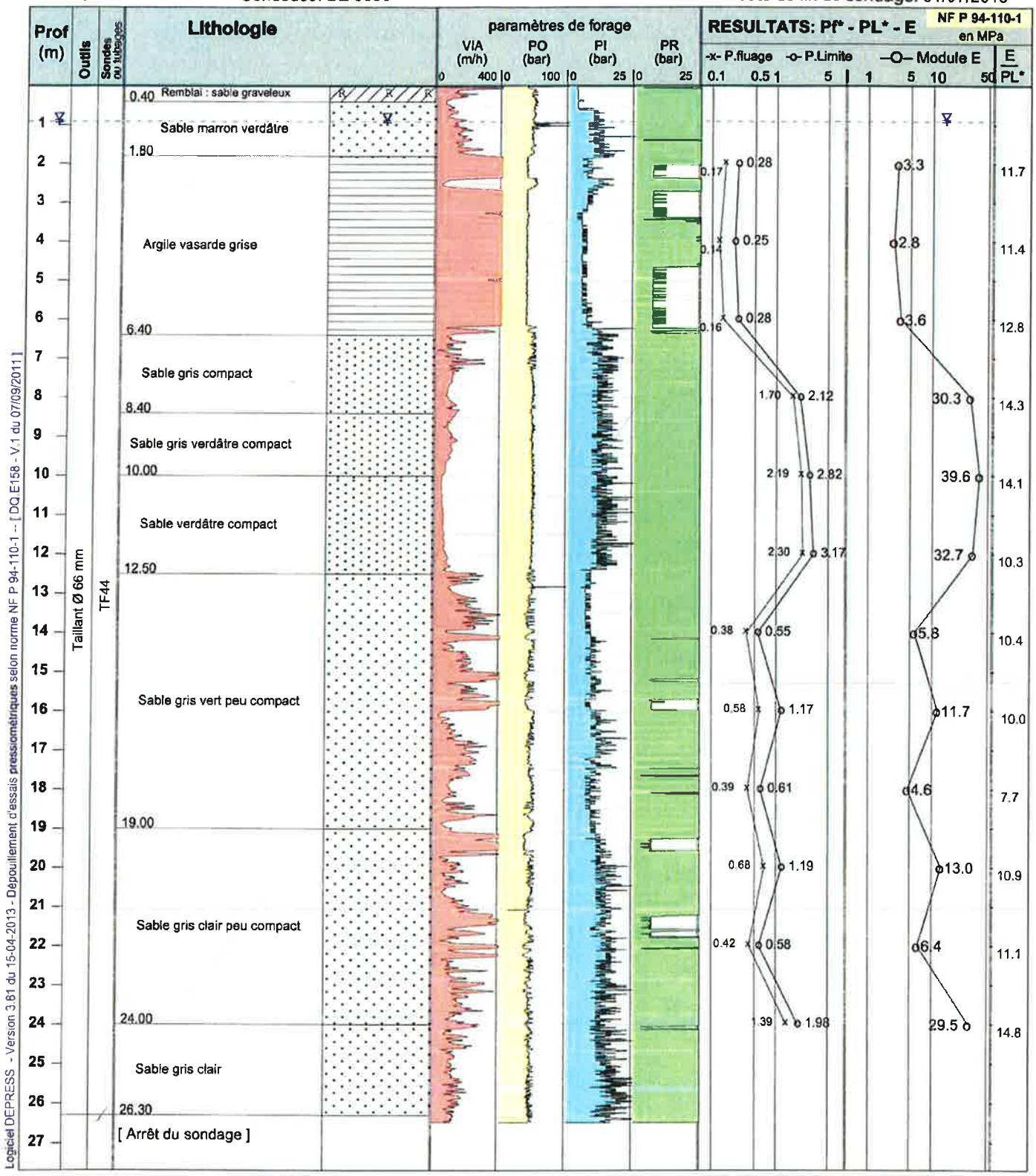
Dossier : DRN2.D.2096

INGENIERIE EUROPE
GROUPE
GINGER CEBTP

Ech.Prof: /

Sondeuse: BE 3050

date de fin de sondage: 01/07/2013



Logiciel DEPRESS - Version 3.81 du 15-04-2013 - Dépouillement d'essais pressiométriques selon norme NF P 94-110-1 - [DQ E158 - V.1 du 07/09/2011]

Observations : /

Nappe: niveau d'eau à 0.9 m.
(à la date d'exécution du forage)

Annexe n° 10 : Détail de l'ébauche dimensionnelle d'un pieu dans le cadre du projet étudié

Etant donné le caractère redondant du calcul, seul le dimensionnement des fondations de la colonne de régénération (sollicitations les plus importantes) sera développé ci-après.

- **DONNEES D'ENTREE**

Les sollicitations, fournies par le client, pour la colonne (charges sur appuis ponctuels) sont les suivantes :

- Etat Limite de Service (ELS) quasi-permanent : V_{max} = 100 T, V_{min} = -30 T et H= 4.7 T ;
- Etat Limite Ultime (ELU) fondamental : V_{max} = 150 T, V_{min} = -80 T et H= 7 T ;
- Etat Limite Ultime (ELU) sismique : V_{max} = 130 T, V_{min} = -65 T et H= 4.1 T.

Les caractéristiques mécaniques retenues pour les calculs sont fournies dans le tableau suivant :

Formation	Nature du sol	Prof. Base (m/TN)	Valeurs pressiométriques	
			p_l^* (MPa)	E_M (MPa)
n°1	Remblais	1.5 à 1.8	-	-
n°2	Argile vasarde grise	6.0 à 6.4	0.25	2.5
n°3	Sable gris vert compact	12.5 à 16.5	2.37	29.0
n°4	Sable gris vert peu compact	> 26.8	0.60	6.0

Les niveaux d'eau relevés ont été rencontrés à des profondeurs comprises entre 0.4 et 0.9 m au moment des investigations.

Ces niveaux d'eau semblent correspondre au niveau de la nappe.

- **SOLUTION DE FONDATION RETENUE**

Compte tenu de l'hétérogénéité de la formation n°1, des faibles caractéristiques de la formation n°2 et des descentes de charge élevées de la structure, une solution de fondations superficielles, semi-profondes ou par radier ancrées dans cette formation ou dans le remblai de substitution n'apparaît pas envisageable pour cet ouvrage du fait de tassements prévisibles totaux et différentiels jugés trop importants.

Pour cet ouvrage, on devra donc s'orienter vers une solution de fondations profondes sur pieux ancrés dans les sables compacts de la formation n°3.

Compte tenu de la présence de la nappe et de terrains majoritairement sableux, les pieux seront réalisés selon une technique permettant une bonne tenue des parois des forages sur toute leur hauteur (foré à la boue, foré tubé, foré tarière creuse, vissé par exemple…) et compatible avec la pose d'un tubage traversant les terrains superficiels.

La proximité des ouvrages avoisinants conduit à rejeter toute solution de fondation par pieux de type battus.

- **EBAUCHE DIMENSIONNELLE D'UN PIEU DE 1000 MM DE DIAMETRE POUR LA COLONNE**

Le diamètre, la longueur et donc le nombre de pieux répartis sous le futur ouvrage pourront varier en fonction de la méthode de forage choisie et des descentes de charges au droit de chaque appui.

Au stade de l'étude (avant-projet), une ébauche dimensionnelle selon la procédure du "modèle de terrain" de la norme NF P 94-262 de juillet 2012 (Eurocode 7) pour un pieu foré simple de 1,0 m de diamètre, descendu à 12,5 m est donnée ci-après :

a. *Valeur caractéristique de la résistance de pointe de la fondation profonde $R_{b;k}$*

Il faut tout d'abord calculer la pression de rupture du terrain sous la base de la fondation profonde, à partir de l'expression suivante :

$$q_b = k_p \cdot p^*_{le}$$

k_p est le facteur de portance, dont le calcul est détaillé en annexe 11.

On obtient $k_p = 1{,}1$

p^*_{le} est la pression limite nette équivalente, dont le calcul est détaillé en annexe 14.

On obtient $p^*_{le} = 1{,}04 MPa$

Donc, la pression de rupture du terrain sous la fondation : $q_b = k_p \cdot p^*_{le} = 1{,}1 \cdot 1{,}04$.

Soit $$q_b = 1{,}15\ MPa$$

Ensuite, on calcule la valeur caractéristique de la pression résistante limite à la base de la fondation profondeur, d'après la formule suivante :

$$q_{b;k} = \frac{q_b}{\gamma_{R;d1} \cdot \gamma_{R;d2}}$$

$\gamma_{R;d1}$ est le coefficient partiel de modèle lié à la dispersion du modèle de calcul ;
$\gamma_{R;d2}$ est le coefficient partiel de modèle lié au calage des méthodes de calcul.

Leurs valeurs dépendent du type de pieu, de la nature du sol d'ancrage et du type de sollicitation du pieu (traction ou compression). Ces valeurs sont fournies dans le tableau F.2.1 de la norme NF P 94-262, joint en annexe 15.

On prend donc : $\gamma_{R;d1} = 1{,}15$ et $\gamma_{R;d2} = 1{,}1$

D'où

$$q_{b;k} = \frac{1{,}15}{1{,}15 \cdot 1{,}1}$$

$$q_{b;k} = 909\ kPa$$

Et enfin :

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k}$$

A_b étant la surface de la base de la fondation profonde.

Donc

$$R_{b;k} = \frac{\pi \cdot 1{,}00^2}{4} \cdot 909$$

$$R_{b;k} = 714\ kN$$

b. Valeur caractéristique de la résistance de frottement axial de la fondation profonde $R_{s;k}$

Il faut tout d'abord déterminer les valeurs du frottement axial unitaire limite q_s pour chaque formation identifiée, sachant que :

$$q_s(z) = \alpha_{pieu-sol} \cdot f_{sol}\left[p_l^*(z)\right]$$

$\alpha_{pieu-sol}$ est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et du type de sol, défini dans le tableau F.5.2.1 de la norme NF P 94-262 joint en annexe 16.

f_{sol} est une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de p_l^* :

$$f_{sol}\left(p_l^*\right) = \left(ap_l^* + b\right) \cdot \left(1 - e^{-cp_l^*}\right)$$

a, b et c sont des paramètres dépendant du type de sol et définis dans le tableau F.5.2.2 de la norme NF P 94-262, joint en annexe 17.

Puis $q_{s;i;k} = \frac{q_s}{\gamma_{R;d1} \cdot \gamma_{R;d2}}$ où $\gamma_{R;d1} = 1{,}15$ et $\gamma_{R;d2} = 1{,}1$ en compression

$\gamma_{R;d1} = 1{,}4$ et $\gamma_{R;d2} = 1{,}1$ en traction

Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus pour les 2 formations traversées (argile et sable) :

Formation	Epaisseur $h_{s;i}$ (m)	Courbe f_{sol}	a	b	c	P_l^* (MPa)	f_{sol}	$\alpha_{pieu-sol}$	q_s (kPa)	$q_{s;i;k}$ (kPa) comp.	$q_{s;i;k}$ (kPa) trac.
2 – Argile	3,4	Q1	0.003	0.04	3.5	0.25	0,024	1,1	26	21	17
3 – Sable	6,1	Q2	0.01	0.06	1.2	2.37	0.079	1,0	79	62	51

Les frottements sont négligés sur 3,0 m pour la partie tubée.

Enfin, $$R_{s;k} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i;k}$$

$A_{s;i}$ est la surface de la section transversale du fût de la fondation.

d'où $$R_{s;k} = \pi \cdot 1{,}00 \cdot \sum_i h_{s;i} \cdot q_{s;i;k}$$

En compression :

$$R_{c;s;k} = \pi \cdot 1{,}00 \cdot (3{,}4 \cdot 21 + 6{,}1 \cdot 62)$$
$$R_{c;s;k} = 1412\ kN$$

En traction :

$$R_{t;s;k} = \pi \cdot 1{,}00 \cdot (3{,}4 \cdot 17 + 6{,}1 \cdot 51)$$
$$R_{t;s;k} = 1159\ kN$$

c. Valeurs caractéristiques de la charge de fluage de compression et de traction

Pour les éléments de fondation mis en œuvre sans refoulement du sol :

En compression :

$$R_{c;cr;k} = 0{,}5 \cdot R_{b;k} + 0{,}7 \cdot R_{c;s;k}$$
$$R_{c;cr;k} = 0{,}5 \cdot 714 + 0{,}7 \cdot 1412$$
$$R_{c;cr;k} = 1345\ kN$$

En traction :

$$R_{t;cr;k} = 0{,}7 \cdot R_{t;s;k}$$
$$R_{t;cr;k} = 0{,}7 \cdot 1159$$
$$R_{t;cr;k} = 811\ kN$$

d. Valeurs de calcul en compression et en traction

Les valeurs de calcul sont données dans le tableau suivant, les calculs sont détaillés en annexe 21.

Portance du terrain $R_{c;d}$	**Portance du terrain $R_{c;d}$**	**Résistance de traction $R_{t;d}$**	**Résistance de traction $R_{t;d}$**	**Charge de fluage de compression $R_{c;cr;d}$**	**Charge de fluage de traction $R_{t;cr;d}$**
ELU fondamental	ELU sismique	ELU fondamental	ELU sismique	ELS quasi-permanent	ELS quasi-permanent
1933 kN	2126 kN	1008 kN	1104 kN	1223 kN	541 kN

Ainsi, à titre indicatif, un pieu de type foré simple, de 1,0 m de diamètre et ancré à 12,5 m de profondeur par rapport au terrain actuel, présente une capacité portante en compression d'environ 1223 kN (122 t) aux ELS, soit environ 1933 kN (193 t) aux ELU et une résistance de traction d'environ 541 kN (54 t) aux ELS, soit environ 1008 kN (101 t) aux ELU.

Le même pieu présente une portance d'environ 2126 kN (213 t) et une résistance à la traction d'environ 1104 kN (110 t) sous sollicitations sismiques.

Ces valeurs sont bien supérieures aux sollicitations retenues en hypothèses.

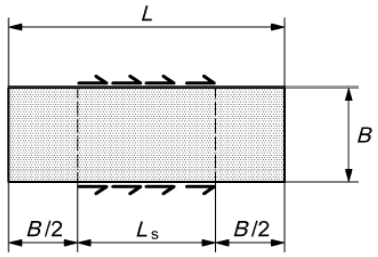
e. Efforts horizontaux

La détermination des charges horizontales admissibles sur les structures doit faire l'objet d'une évaluation spécifique à partir des données précédentes en intégrant les liaisons mécaniques existantes en tête des pieux.

Ne disposant pas d'information sur les liaisons mécaniques, l'estimation de l'effort tranchant limite T_o et du moment fléchissant M_o en tête de pieu est établie pour un pieu long et flexible encastré en tête et soumis à un effort horizontal en tête, et dans le cas où l'on considérerait le module de réaction horizontal constant avec la profondeur.

On admet que le sol exerce en chaque section de l'élément une réaction perpendiculaire à l'axe de celui-ci, qui est fonction du déplacement relatif transversal de la section considérée, et que cette réaction se compose :

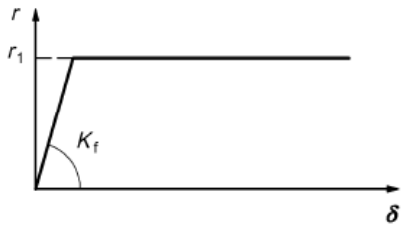
- De pressions frontales, que l'on modélise par une pression uniforme s'exerçant sur le diamètre du pieu, noté B ;
- D'efforts de frottements transversaux s'exerçant sur les parties du périmètre parallèles au sens du déplacement ; toutefois, une part de ces frottements étant déjà intégrée dans les pressions frontales citées ci-dessus, on retranche la valeur B à chacune de ces parties pour l'évaluation du frottement.



Légende : $L_s = L - B$: longueur de calcul des frottements latéraux.

Figure 7 – Longueur de calcul des frottements latéraux (Norme NF P 94-262 Figure I.1.2)

La loi de mobilisation de la réaction frontale de courte durée est définie conformément à la figure suivante :



Légende : r_1: réaction frontale ; δ : déplacement relatif de l'élément de fondation.

Figure 8 – Loi de réaction frontale

Le pieu est considéré comme une poutre reposant sur des appuis élasto-plastiques dont la « raideur » est caractérisée par K_{fc}, le module linéique de mobilisation de la pression frontale de courte durée, défini par :

$$K_{fc} = \frac{12 E_M}{\frac{4}{3}.\left(\frac{B_0}{B}\right)\left(\frac{2.65.B}{B_0}\right)^{\alpha} + \alpha} \text{ lorsque } B \geq B_0$$

E_M est le module pressiométrique de Ménard ;

B est la largeur de l'élément perpendiculairement au sens de déplacement ;

B_0 est une largeur de référence prise égale à 0,60 m ;

α est le coefficient rhéologique du terrain dans la méthode pressiométrique, il est fourni par les tableaux I.1.3.1 et I.1.3.2 de la norme NF P 94-262, joints en annexe 20.

On considérera, en première approximation, que les caractéristiques mécaniques à prendre en compte pour l'évaluation des efforts et des moments en tête de pieu sont celles de la formation 1 (argile), soit :

- Module pressiométrique de Ménard E_M = 2,5 MPa ;
- Coefficient rhéologique α = 2/3 ;
- Pression de fluage nette p_f^* = 0,125 MPa ;

Pour justifier cette approximation et le calcul simplifié qui en résulte, on vérifiera ensuite que la longueur de transfert L_0 obtenue reste inférieure ou du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la formation 1.

On a donc :

$$K_{fc} = \frac{12 \cdot 2{,}5}{\frac{4}{3}.\left(\frac{0{,}6}{1{,}0}\right)\left(\frac{2.65.1{,}0}{0{,}6}\right)^{2/3} + \frac{2}{3}}$$

$$K_{fc} = 10{,}64\ MPa$$

Pour une longue durée d'application :

$$K_{fl} = \frac{1}{2} \cdot K_{fc}$$

$$K_{fl} = 5{,}32\ MPa$$

Par ailleurs, r_f est le seuil de plasticité de réaction frontale, défini par :

$$r_f = B \cdot p_f^*$$

$$r_f = 125\ kN/m$$

Les résultats obtenus à partir de ces hypothèses sont les suivants, les calculs sont détaillés en annexe 22 :

	Sollicitations de courte durée (ELU)	**Sollicitations de longue durée (ELS)**
L_0 **(m)**	4,86	4,40
T_0 **(kN)**	**304**	**275**
M_0 **(kN.m)**	**-739**	**-606**

La longueur de transfert L_0 est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la formation 1, ce qui justifie les hypothèses prises en compte.

Remarque : la détermination des charges horizontales admissibles sur les structures doit faire l'objet d'une évaluation spécifique à partir des données précédentes et selon les recommandations du fascicule 62 titre V, en intégrant les liaisons mécaniques existantes en tête des pieux.

f. Remarques

D'une manière générale, la capacité portante des pieux est limitée vis-à-vis du taux de travail admissible du béton (5 à 6 MPa mais cette valeur peut être supérieure en fonction de la formulation du béton et de la méthode de forage employée).

En fonction de l'écartement entre les pieux retenu et des charges appliquées, on devra tenir compte d'un éventuel effet de groupe (minoration de la capacité portante des pieux du fait de leur nombre et de leur rapprochement, cf. NF P 94-262).

Aucun frottement négatif n'a été pris en compte pour l'ébauche dimensionnelle proposée du fait de l'absence de surcharges notables prévues aux abords des pieux et du décaissement des terrains sur plusieurs mètres de hauteur. Cette hypothèse devra néanmoins être vérifiée car elle conditionne le dimensionnement des pieux. En effet, si des charges importantes sont prévues aux abords immédiats des pieux, des efforts parasites tels que des frottements négatifs ou des efforts horizontaux seront à considérer dans la justification des fondations.

Une définition succincte du frottement négatif est donnée en annexe 23.

Annexe n° 11 : Calcul du facteur de portance k_p

k_p est le facteur de portance, il dépend de la hauteur d'encastrement effective D_{ef} définie selon la formule suivante :

$$D_{ef} = \frac{1}{p^*_{le}} \int_{D-h_D}^{D} p^*_l(z) \cdot dz$$

p^*_{le} est la pression limite nette équivalente, elle est calculée à l'annexe 8 ;
D désigne la longueur d'encastrement de la fondation par rapport au terrain naturel (ici 12,5 m) ;
h_D désigne une longueur égale à 10B (où B est la plus petite dimension de la fondation, ici 1,0 m) ;
$p^*_l(z)$ est la pression limite à la profondeur z.

Au minimum, l'encastrement effectif dans la couche porteuse est pris égal à 3 diamètres ou 1,50 m pour des pieux de diamètre supérieur à 0,5 m.

$$D_{ef} = \frac{1}{1{,}04} \int_{2{,}5}^{12{,}5} p^*_l(z) \cdot dz$$

$$D_{ef} = \frac{1}{1{,}04} \left(\int_{2{,}5}^{6{,}4} 0{,}25 \cdot dz + \int_{6{,}4}^{12{,}5} 2{,}37 \cdot dz \right)$$

$$D_{ef} = \frac{1}{1{,}04} \left([0{,}25 \cdot z]_{2{,}5}^{6{,}4} + [2{,}37 \cdot z]_{6{,}4}^{12{,}5} \right)$$

$$D_{ef} = \frac{1}{1{,}04} \left([0{,}25 \cdot 6{,}4 - 0{,}25 \cdot 2{,}5] + [2{,}37 \cdot 12{,}5 - 2{,}37 \cdot 6{,}4] \right)$$

$$D_{ef} = 14{,}84\, m$$

- Lorsque l'encastrement effectif D_{ef} / B est supérieur à 5 : $k_p(D_{ef} / B) = k_{p\max}$;
- Lorsque l'encastrement effectif D_{ef} / B est inférieur à 5 :

$$k_p(D_{ef} / B) = 1{,}0 + \frac{(k_{p\max} - 1{,}0) \cdot (D_{ef} / B)}{5}$$

$k_{p\max}$ est fourni d'après le tableau F.4.2.1 de la norme NF P 94-262 joint en annexe 12, il dépend du terrain mais également de la classe de pieu définie par le tableau A.1 également joint en annexe 13.

Dans notre cas, il s'agit d'un pieu foré simple de classe 1 et le terrain d'ancrage de la fondation est un sable, donc : $\boxed{k_{p\max} = 1{,}1}$

Puis, $D_{ef} / B = 14{,}84\, m > 5\, m$, d'où $k_p(D_{ef} / B) = k_{p\max}$

On obtient : $\boxed{k_p = 1{,}1}$

Annexe n° 12 : Tableau F.4.2.1 de la norme NF P 94-262

Valeur du facteur de portance pressiométrique k_{pmax}

Terrain / Classe de pieu (c)	Argile % $CaCO_3$ < 30 % Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire-marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5 #	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6 #	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7 #	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

(#) pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50 % sur le facteur k_p.

(a) La valeur de k_p pour les roches altérées et fragmentées doit être prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Dans le cas des roches saines, il convient (F.1 (2) Note 1) d'apprécier si une justification basée sur les méthodes de la présente annexe F et à l'évidence pessimiste est suffisante, ou bien s'il convient d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

(b) Pour les micropieux, la résistance de pointe n'est normalement pas pris en compte.

(c) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(d) D'autres valeurs de k_{pmax} peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

Annexe n° 13 : Tableau A.1 de la norme NF P 94-262

Classes et catégories de pieux

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Annexe n° 14 : Calcul de la pression limite nette équivalente p^*_{le}

$$p^*_{le} = \frac{1}{b+3a}\int_{D-b}^{D+3a} p^*_l(z)\cdot dz \text{ avec } b = \min\{a, h\}$$

Où : - a est pris égal à la moitié de la largeur B de l'élément de fondation si celle-ci est supérieure à 1,00 m et à 0,50 m dans le cas contraire ;

- h désigne la hauteur de l'élément de fondation contenue dans la formation porteuse.

Dans notre cas :

$$a = 0{,}50\ m$$

$$h = 6{,}10\ m$$

Donc :

$$b = 0{,}50\ m$$

$$D = 12{,}50\ m$$

$$p^*_{le} = \frac{1}{b+3a}\int_{D-b}^{D+3a} p^*_l(z)\cdot dz$$

$$p^*_{le} = \frac{1}{2{,}00}\int_{12{,}00}^{14{,}00} p^*_l(z)\cdot dz$$

$$p^*_{le} = \frac{1}{2{,}00}\left(\int_{12{,}00}^{12{,}50} 2{,}37\cdot dz + \int_{12{,}50}^{14{,}00} 0{,}60\cdot dz\right)$$

$$p^*_{le} = \frac{1}{2{,}00}\left([2{,}37\cdot z]_{12{,}00}^{12{,}50} + [0{,}60\cdot z]_{12{,}50}^{14{,}00}\right)$$

$$p^*_{le} = \frac{1}{2{,}00}\left([2{,}37\cdot 12{,}50 - 2{,}37\cdot 12{,}00] + [0{,}60\cdot 14{,}00 - 0{,}60\cdot 12{,}50]\right)$$

$$\boxed{p^*_{le} = 1{,}04\ MPa}$$

Annexe n° 15 : Tableau F.2.1 de la norme NF P 94-262

Valeur des coefficients de modèle pour la méthode pressiométrique

	Procédure du « pieu modèle » (utilisation des coefficients ξ ou de l'annexe D de la norme NF EN 1990) Procédure du « modèle de terrain »		Procédure du « modèle de terrain »	
	$\gamma_{R;d1}$ Compression	$\gamma_{R;d1}$ Traction	$\gamma_{R;d2}$ Compression	$\gamma_{R;d2}$ Traction
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15	1,15	1,4	1,1	
Pieux ancrés dans la craie de classe 1à 7 hors pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20	1,4	1,7		
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20	2,0	2,0		

Annexe n° 16 : Tableau F.5.2.1 de la norme NF P 94-262

Choix des valeurs de $\alpha_{pieu-sol}$ – Méthode pressiométrique

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile % $CaCO_3$ < 30 % Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	1,1	1	1,8	1,5	1,6
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	1,25	1,4	1,8	1,5	1,6
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	0,7	0,6	0,5	0,9	—
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	1,25	1,4	1,7	1,4	—
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	1,3	—	—	—	—
6	FTC, FTCD (c)	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	1,5	1,8	2,1	1,6	1,6
7	VM	Vissé moulé	1,9	2,1	1,7	1,7	—
8	VT	Vissé tubé	0,6	0,6	1	0,7	—
9	BPF**, BPR**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	1,1	1,4	1	0,9	—
10	BE**	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	2	2,1	1,9	1,6	—
11	BM**	Battu moulé	1,2	1,4	2,1	1	—
12	BAF**	Battu acier fermé	0,8	1,2	0,4	0,9	—
13	BAO** #	Battu acier ouvert	1,2	0,7	0,5	1	1
14	HB** #	H battu	1,1	1	0,4	1	0,9
15	HBI**	H battu injecté IGU ou IRS	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
16	PP** #	Palplanches battues	0,9	0,8	0,4	1,2	1,2
17	M1	Micropieu type I	—	—	—	—	—
18	M2	Micropieu type II	—	—	—	—	—
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	3,4	3,8	3,1	3,1	3,1

** Il convient de se reporter à l'article A.10 pour le calcul du périmètre.

Pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, et pas par battage, il y a lieu de faire un abattement de 30% sur les valeurs de q_s.

Pour les pieux de grande longueur, il convient d'appliquer la clause (6) de la présente section.

(a) Pour les micropieux BE, HBi, MIGU, PIGU, PIRS et MIRS, les valeurs proposées correspondent à une exécution stricte et soignée de l'injection correspondante. Les essais de conformité (Section 8.9) permettront de définir précisément les valeurs de frottement axial unitaire à considérer. Il convient ensuite d'appliquer les valeurs ξ1' et ξ2' du tableau C.2.3.1. On attire l'attention que cette recommandation est d'autant plus importante dans les argiles et les marnes que les performances dans ces terrains sont très sensibles à toute insuffisance lors de la mise en œuvre.

(b) Pour les micropieux et les pieux de catégorie 17 et 18, il convient de considérer les valeurs de frottement axial unitaire des techniques de pieux ou de micropieux les plus proches sur le plan de la technologie.

(c) Les valeurs mentionnées pour les fondations profondes de catégorie 6 sont données pour des pieux réalisés avec un enregistrement continu des paramètres de forage et de bétonnage (tableau 6.4.1.1 Note (1)). Dans le cas contraire, on s'expose à des discontinuités et des détériorations du pieu lors de sa réalisation.

(d) Les valeurs mentionnées pour les fondations profondes de catégorie 7 mises en œuvre avec une technique de bétonnage directement à la pompe à béton sont données pour des pieux réalisés avec un enregistrement continu des paramètres de réalisation du pieu. Dans le cas contraire, on s'expose à des discontinuités et des détériorations du pieu lors de sa réalisation.

(e) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(f) D'autres valeurs peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

Annexe n° 17 : Tableau F.5.2.2 de la norme NF P 94-262

Valeurs numériques des paramètres a,b et c des courbes f_{sol} – Méthode pressiométrique

Type de sol	Argile % $CaCO_3$ < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a	0,003	0,01	0,007	0,008	0,01
b	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c	3,5	1,2	1,3	3	3

Annexe n° 18 : Tableaux C.2.3.1 et C.2.3.2 de la norme NF P 94-262

Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les pieux

Tableau C.2.3.1 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les pieux – Situations durables et transitoires

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	γ_b	1,1	1,1	1,1
Fut (compression) [a]	γ_s	1,1	1,1	1,1
Total/combiné (compression) [a]	γ_t	1,1	1,1	1,1
Fût en traction [a]	$\gamma_{s;t}$	1,15	1,15	1,15
[a] conforme aux tableaux A.6 à A.8 de l'annexe A de NF EN 1997-1 – Jeu R2.				

Tableau C.2.3.2 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les pieux – Situations accidentelles

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	γ_b	1,0	1,0	1,0
Fut (compression)	γ_s	1,0	1,0	1,0
Total/combiné (compression)	γ_t	1,0	1,0	1,0
Fût en traction	$\gamma_{s;t}$	1,05	1,05	1,05

Annexe n° 19 : Tableaux 14.2.1.1 et 14.2.1.2 de la norme NF P 94-262

Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les fondations profondes – ELS

Tableau 14.2.1.1 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les fondations profondes – ELS – Combinaisons caractéristiques

Résistance	Symbole	Valeurs
Fût en compression	γ_{cr}	0,9
Fût en traction (y compris micropieux)	$\gamma_{s;cr}$	1,1

Tableau 14.2.1.2 — Facteurs partiels de résistance (γ_R) pour les fondations profondes – ELS – Combinaisons quasi permanentes

Résistance	Symbole	Valeurs
Fût en compression	γ_{cr}	1,1
Fût en traction (y compris micropieux)	$\gamma_{s;cr}$	1,5

Annexe n° 20 : Tableaux I.1.3.1 et I.1.3.2 de la norme NF P 94-262

Coefficients rhéologiques α – Méthode pressiométrique

Tableau I.1.3.1 – Coefficients rhéologiques α - Méthode pressiométrique

Terrain [a]	Tourbe	Argile		Limon		Sable		Grave	
	α	E_M/p_l	α	E_M/p_l	α	E_M/p_l	α	E_M/p_l	α
I	-	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
II	1	9 - 16	2/3	8 - 14	1/2	7 - 12	1/3	6 - 10	1/4
III	-	7 - 9	1/2	5 - 8	1/2	5 - 7	1/3	-	-

a I : terrain surconsolidé ou très serré,
II : terrain normalement consolidé ou normalement serré,
III : terrain sous-surconsolidé altéré et remanié ou lâche.

Tableau I.1.3.2 – Coefficients α pour les terrains rocheux - Méthode pressiométrique

Rocher	α
Très peu fracturé	2/3
Normal	1/2
Très fracturé	1/3
Très altéré	2/3

Annexe n° 21 : Valeurs de calcul en compression et en traction

Valeurs de calcul de la portance du terrain sous une fondation profonde (compression)

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{c;s;k}}{\gamma_s}$$

γ_b et γ_s sont des facteurs partiels qui dépendent des situations de calcul et qui sont fournis dans les tableaux C.2.3.1 et C.2.3.2 de la norme NF P 94-262, joints en annexe 18.

- *Pour les situations durables et transitoires (ELU en combinaisons fondamentales)*

$$R_{c;d} = \frac{714}{1{,}1} + \frac{1412}{1{,}1}$$

$$R_{c;d} = 1933\ kN$$

- *Pour les situations accidentelles (ELU en combinaisons sismiques)*

$$R_{c;d} = \frac{714}{1{,}0} + \frac{1412}{1{,}0}$$

$$R_{c;d} = 2126\ kN$$

Valeurs de calcul de la résistance de traction de la fondation profonde

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;s;k}}{\gamma_{s;t}}$$

$\gamma_{s;t}$ est un facteur partiel qui dépend des situations de calcul et qui est fourni dans les tableaux C.2.3.1 et C.2.3.2 de la norme NF P 94-262, joints en annexe 18.

- *Pour les situations durables et transitoires (ELU en combinaisons fondamentales)*

$$R_{t;d} = \frac{1159}{1{,}15}$$

$$R_{t;d} = 1008kN$$

- *Pour les situations accidentelles (ELU en combinaisons sismiques)*

$$R_{t;d} = \frac{1159}{1{,}05}$$

$$R_{t;d} = 1104kN$$

Valeur de calcul de la charge de fluage de compression

$$R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$$

γ_{cr} est un facteur partiel qui dépend des situations de calcul et qui est fourni dans les tableaux 14.2.1.1 et 14.2.1.2 de la norme NF P 94-262, joints en annexe 19.

- *Pour les ELS en combinaisons quasi-permanentes*

$$R_{c;cr;d} = \frac{1345}{1{,}1}$$

$$R_{c;cr;d} = 1223\ kN$$

Valeur de calcul de la charge de fluage de traction

$$R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$$

$\gamma_{s;cr}$ est un facteur partiel qui dépend des situations de calcul et qui est fourni dans les tableaux 14.2.1.1 et 14.2.1.2 de la norme NF P 94-262, joints en annexe 19.

- *Pour les ELS en combinaisons quasi-permanentes*

$$R_{t;cr;d} = \frac{811}{1{,}5}$$

$$R_{t;cr;d} = 541\ kN$$

Annexe n° 22 : Calcul de la longueur de transfert, de l'effort tranchant et du moment fléchissant à l'aide du Fascicule 62 – titre V

La longueur de transfert est définie comme suit :

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{K_f \cdot B}}$$

E_j est le module de déformation longitudinale du béton * ;

I est l'inertie du pieu : $I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = 0.0491\ m^4$;

K_f est le module linéique de mobilisation : $K_{fc} = 10{,}64\ MPa$ et $K_{fl} = 5{,}32\ MPa$;

B est le diamètre du pieu : $B = 1{,}00\ m$.

* Les modules de déformation longitudinale instantanée du béton E_{ij} et différée E_{vj} à considérer sont donnés par :

$$E_{ij} = 11000 \cdot f_c^{1/3} \text{ et } E_{vj} = 3700 \cdot f_c^{1/3}$$

f_c est la résistance conventionnelle du béton : $f_c = \frac{\min\{f_{c28}, f_{c\lim}\}}{k_1 \cdot k_2}$;

f_{c28} est la résistance caractéristiques du béton à 28 jours : $f_{c28} = 30\,MPa$;

$f_{c\lim}$ est donnée par le tableau ci-dessous, extrait du fascicule 62 – titre V : $f_{c\lim} = 25MPc.$

GROUPE A	f_{clim}	k_1
Semelles superficielles et radiers	f_{c28}	1,00
Pieux ou parois préfabriqués mis en place dans un forage	f_{c28}	1,00
Pieux tubulaires précontraints	30 MPa	1,15
Pieux préfabriqués battus en béton armé	30 MPa	1,15
Puits avec béton vibré	f_{c28}	1,00
Puits avec béton non vibré	f_{c28}	1,20
GROUPE B		
Pieux battus pilonnés (1)	25 MPa	1,20
Pieux battus moulés	25 MPa	1,20
Pieux et barrettes forés simples	25 MPa	1,20
Pieux forés tubés : – bétonnés à sec	25 MPa	1,10
– bétonnés sous l'eau	25 MPa	1,20
Pieux forés à la tarière creuse (1) : – type 1	25 MPa	1,50
– type 2	25 Mpa	1,20
– type 3	25 MPa	1,05
Pieux et barrettes bétonnés sous boue, parois moulées	25 MPa	1,20
(1) Sauf dispositions différentes du marché, ces types de pieux ne peuvent être utilisés pour les fondations des ponts (***.*).		

k_1 est également fourni par le tableau précédent : $k_1 = 1{,}20$ (pieu foré simple) ;

k_2 prend les valeurs suivantes :

- Eléments du groupe A : 1,00
- Eléments du groupe B :
  - dont le rapport du diamètre D à la longueur L est inférieur à 1/20 : 1,05
  - dont le diamètre D est inférieur à 0,60 m : 1,30 - (d/2)
  - réunissant les deux conditions précédentes : 1,35 - (d/2)
  - autres cas : 1,00

d'où : $k_2 = 1{,}00$

Donc $$f_c = \frac{\min\{30{,}25\}}{1{,}20 \cdot 1{,}00}$$

$$f_c = 20{,}83\ MPa$$

Puis $E_{ij} = 30267{,}67\ MPa$ et $E_{vj} = 10180{,}94\ MPa$

D'où $L_0 = 4{,}86\ m$ pour une sollicitation de courte durée (ELU)

et $L_0 = 4{,}40\ m$ pour une sollicitation de longue durée (ELS)

Ensuite, en assimilant le pieu encastré en tête dans un chevêtre rigide à une poutre, on a :

$$T_{0,\max} = \frac{r_f \cdot L_0}{2}$$

$T_{0,\max} = \frac{125 \cdot 4{,}86}{2}$ soit $T_{0,\max} = 304\ kN$ pour une sollicitation de courte durée (ELU)

$T_{0,\max} = \frac{125 \cdot 4{,}40}{2}$ soit $T_{0,\max} = 275\ kN$ pour une sollicitation de longue durée (ELS)

Et enfin, $$M_{0,\max} = \frac{-T_0 \cdot L_0}{2}$$

$M_{0,\max} = \frac{-304 \cdot 4{,}86}{2}$ soit $M_{0,\max} = 739\ kN.m$ pour une sollicitation de courte durée (ELU)

$M_{0,\max} = \frac{-275 \cdot 4{,}40}{2}$ soit $M_{0,\max} = 606\ kN.m$ pour une sollicitation de longue durée (ELS)

Le moment maximum se situe en tête du pieu.

Annexe n° 23 : Définition du frottement négatif

Un pieu de fondation est soumis à différents efforts en tête notamment en compression verticale. Lorsque la charge est appliquée sur le pieu, il se produit une légère déformation du sol sous sa pointe, entraînant un déplacement de celui-ci.

Le fonctionnement habituel du pieu et optimal que l'on recherche est celui pour lequel la charge de compression est équilibrée par la capacité de pointe et la résistance mobilisée le long du fût. Cette réaction pieu-sol est dirigée de bas vers le haut. Elle est couramment appelée frottement positif.

Il peut arriver que certaines couches de terrain entourant le pieu tassent elles-mêmes plus rapidement que le pieu (du fait de couches compressibles ou de remblais récents non stabilisés par exemple). On observe donc une différence de vitesse de tassement qui induit des mouvements relatifs en sens contraire. Ce phénomène s'appelle frottement négatif.

Annexe n° 24 : Extrait du Code de l'Environnement

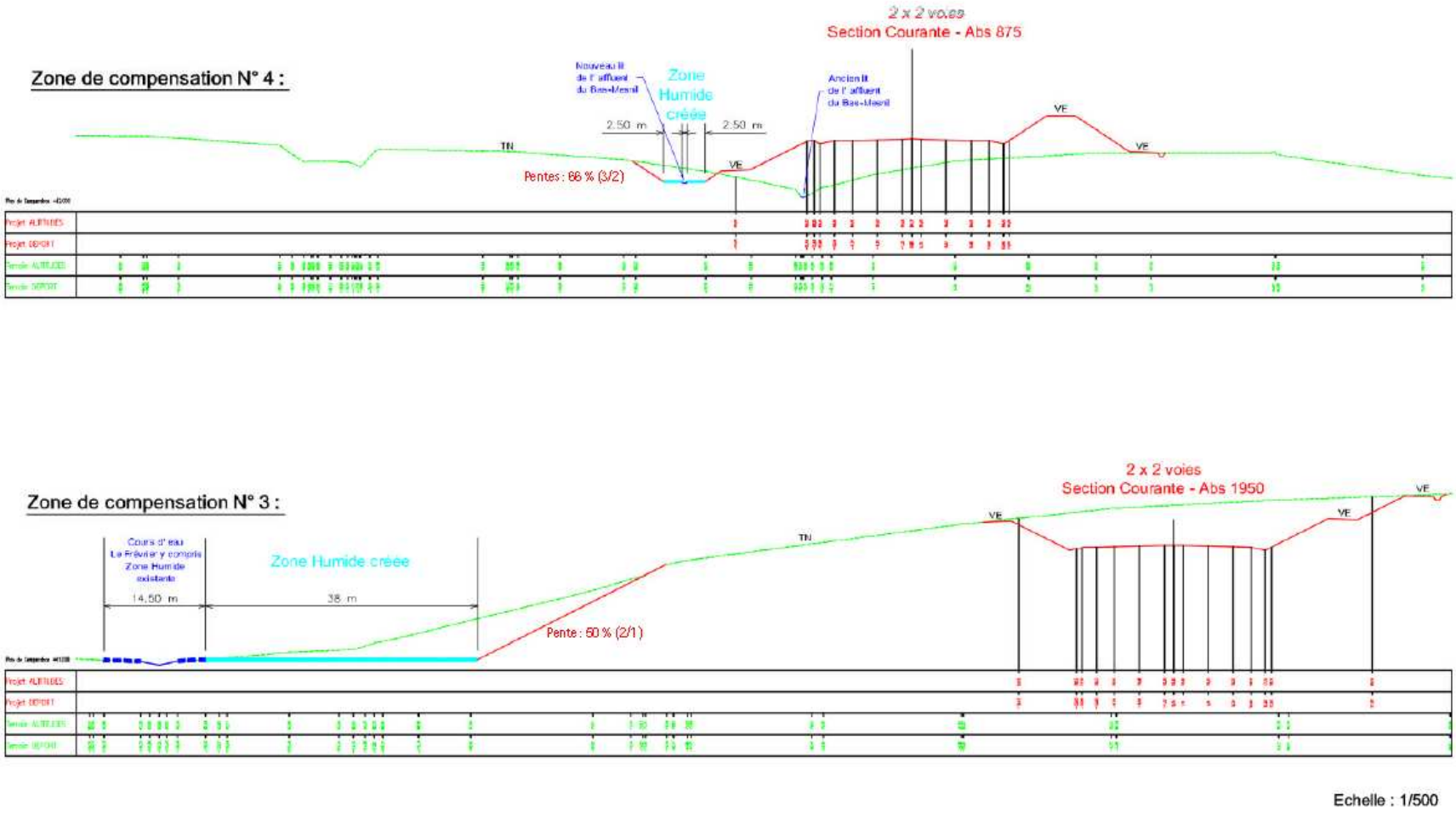
Tableau des rubriques par lesquelles le projet de Sartilly est concerné

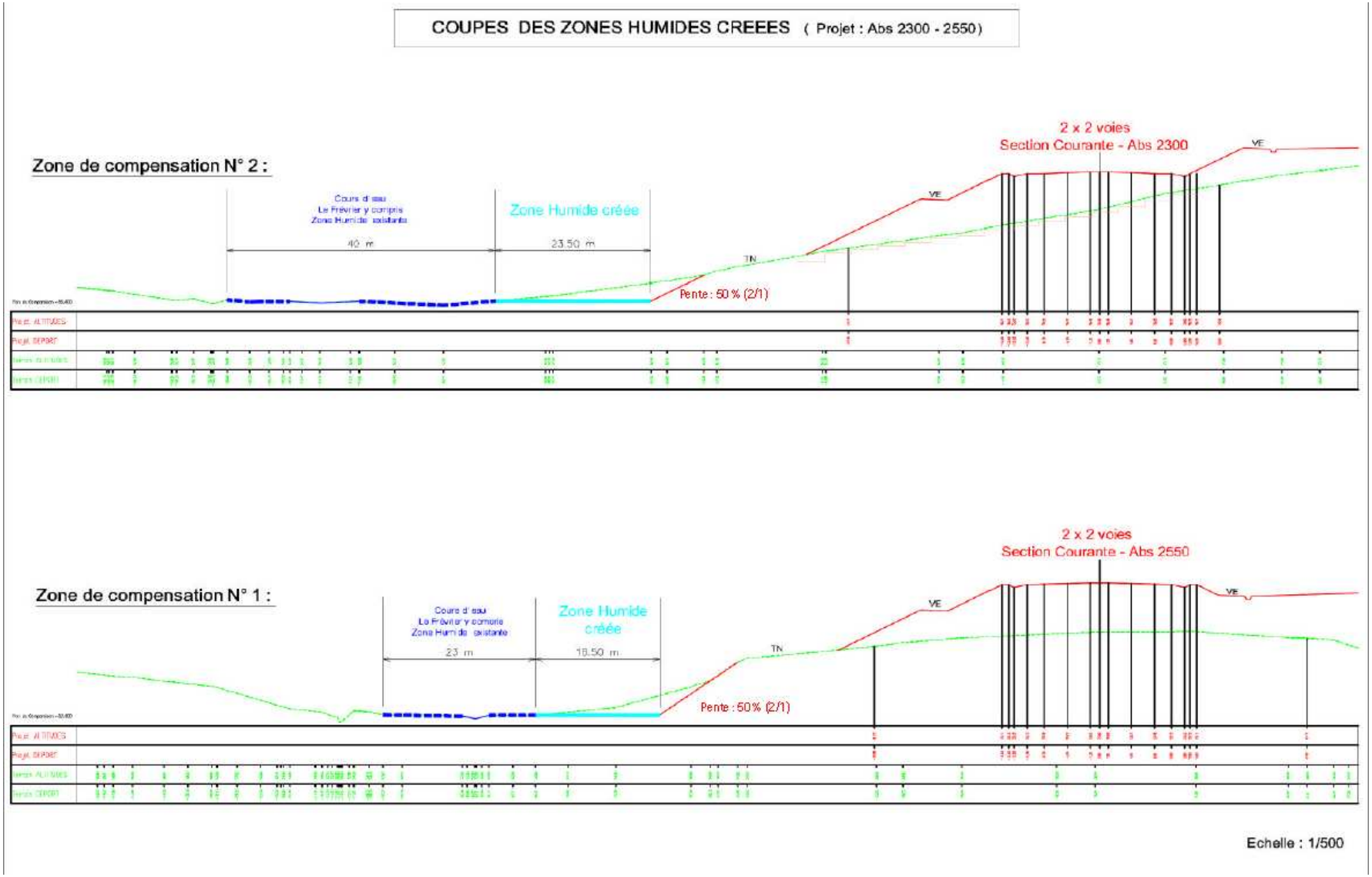
En rose, il s'agit de la configuration du projet.

Rubriques	Enonce	Application au projet	Régime resultant
2.1.5.0	Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet étant :	Superficie projet collectée : 13.9 ha Superficie impluvium extérieur interceptée par le projet : 71.5 ha Superficie totale interceptée par le projet : 85.4 ha	Autorisation
	Supérieure ou égale à 20 ha (Autorisation)		
	Supérieure à 1 ha mais inférieure à 20 ha (Déclaration)		
3.1.1.0	Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant :	Les ouvrages cadres du projet rétablissent les écoulements en crue et la continuité écologique du ruisseau du Vieux Frevrier et de ses affluents	Pas concerné par cet article
	Un obstacle à l'écoulement des crues (Autorisation)		
	Un obstacle à la continuité écologique entraînant une différence de niveau supérieure ou égale à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation (Autorisation)		
	Un obstacle à la continuité écologique entraînant une différence de niveau supérieure ou égale à 20 cm mais inférieur à 50 cm pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation (Déclaration)		
3.1.2.0	Installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau, à l'exclusion de transport naturel	Modification du lit mineur sur 230 m cumulé Déviation d'un affluent du Vieux Frevrier sur 120 m	Autorisation
	Sur une longueur de cours d'eau supérieure ou égale à 100 m (Autorisation)		
	Sur une longueur de cours d'eau inférieure à 100 m (Déclaration)		
3.1.3.0	Installations ou ouvrages ayant un impact sensible sur la luminosité nécessaire au maintien de la vie et de la circulation aquatique dans un cours d'eau sur une longueur :	Couverture des ouvrages cadres : OH 3 de 120 m ; OH 7 de 100 m.	Autorisation
	Supérieure ou égale à 100 m (Autorisation)		
	Supérieure ou égale à 10 m et inférieure à 100 m (Déclaration)		
3.2.2.0	Installations, ouvrages, remblais dans le lit majeur d'un cours d'eau	Surface soustraite : 0 ha	Pas concerné par cet article
	Surface soustraite supérieure ou égale à 10 000 m² (Autorisation)		
	Surface soustraite supérieure ou égale à 400 m² et inférieure à 10 000 m² (Déclaration)		
3.3.1.0	Assèchement, mise en eau, imperméabilisation, remblais de zones humides ou de marais, la zone asséchée ou mise en eau étant	Superficie zone humide remblayée de 1 ha	Autorisation
	Supérieure ou égale à 1 ha (Autorisation)		
	Supérieure à 0.1 ha mais inférieure à 1 ha (Déclaration)		

Annexe n° 25 : Coupes des zones humides créées le long du projet

COUPES DES ZONES HUMIDES CREEES (Projet : Abs 875 - 1950)




COUPES DES ZONES HUMIDES CREEES (Projet : Abs 2300 - 2550)
Zone de compensation N° 2 :
2 x 2 voies
Section Courante - Abs 2300
Cours d'eau
Le Frêvier y compris
Zone Humide existante
Zone Humide créée
40 m
23,50 m
TN
VE
Pente : 50 % (2/1)
Zone de compensation N° 1 :
2 x 2 voies
Section Courante - Abs 2550
Cours d'eau
Le Frêvier y compris
Zone Humide existante
Zone Humide
créée
23 m
18,50 m
TN
VE
Pente : 50 % (2/1)
Echelle : 1/500

Annexe n° 26 : Vérification de la stabilité des talus sur TALREN

L'utilisation du logiciel passe par plusieurs étapes :

- Description de l'étude :
  - Nom du projet, caractéristiques succinctes ;
  - Limites géométriques du profil (X_{min}, X_{max}, Y_{min} et Y_{max}) ;
  - Jeu de coefficients de sécurité utilisé (en phase provisoire : F = 1.3, définitive : F = 1.5).
- Définition de la géométrie du profil :
  - Coordonnées de l'ensemble des points du profil étudié ;
  - Segments nécessaires pour relier les points selon la géométrie du projet.
- Définition de la géologie du profil :
  - Caractéristiques des formations en présence (cohésion et angle de frottement interne à long terme) ;
  - Emplacement des formations en présence.
- Préparation du calcul :
  - Création de phases (par exemple : phase provisoire, phase définitive, avec banquette, avec merlon, etc.) : on peut modifier la géométrie du profil en activant ou en désactivant certaines zones de sol ;
  - Au sein d'une même phase, création de situation différentes (par exemple : variation des caractéristiques du sol, variation de la zone de passage du cercle de rupture).
- Calcul

Le logiciel TALREN repose sur la méthode de Bishop qui permet de calculer le coefficient de sécurité propre à un cercle de glissement donné. De plus, ce logiciel va permettre de trouver le cercle le plus défavorable, c'est-à-dire celui qui présente le coefficient de sécurité le plus faible (ce qui est fastidieux et incertain à la main).

L'intérêt du logiciel est qu'il balaye de façon automatique l'ensemble de l'espace possible pour les centres des cercles, avec un pas plus ou moins important (paramétrable par l'utilisateur). Cette recherche automatique évite à l'utilisateur de définir les paramètres nécessaires dans le cas d'une recherche manuelle.

Le principe de la recherche automatique est illustré sur les 2 figures suivantes :

- Un premier balayage automatique permet de détecter un cercle critique (correspondant au minimum absolu du coefficient de sécurité obtenu sur tous les cercles calculés) ;
- TALREN effectue ensuite systématiquement un deuxième balayage automatique dans la zone autour du cercle critique détecté lors du 1er balayage ;
- Le coefficient de sécurité affiché est le minimum obtenu sur l'ensemble de ces 2 balayages.

Les paramètres nécessaires pour une recherche automatique sont explicités dans le manuel d'utilisation de TALREN. Le paramètre principal est le « nombre de découpages », c'est lui qui détermine la densité du maillage automatique : il correspond au nombre de directions, au nombre de distances et au nombre de rayons calculés pour chaque balayage. Par exemple, avec un nombre de découpages de 10, le nombre de cercles calculés au terme des 2 balayages sera égal à 2 x 10 x 10 x 10 = 2000.

Le positionnement des centres à différentes distances selon une même direction se fait de la façon suivante :

- Soit L la longueur du segment reliant le point de passage imposé pour le 1er cercle (défini par l'utilisateur) à l'autre point d'intersection avec le talus (cf. Figure 5) ;
- Le centre le plus proche du talus se trouve à une distance L/2 de ce segment ;
- Le second centre se trouve à L/2 du premier ;
- Pour les suivants, l'espacement entre 2 centres sur la même direction est égal à L ;
- Le nombre de centres positionné selon une direction est égal au "nombre de découpages".

Remarque : Il convient d'être prudent dans l'analyse des résultats d'une recherche automatique. Il peut notamment arriver que le premier niveau de balayage détecte 2 minima du coefficient de sécurité quasiment égaux dans des zones différentes. Le 2ème niveau de balayage raffinera ensuite uniquement la zone correspondant au minimum absolu, alors qu'un raffinement de l'autre zone aurait pu conduire à un coefficient de sécurité plus faible, qui n'aura ainsi pas été détecté. L'affichage d'isovaleurs permet de vérifier rapidement si le minimum du coefficient de sécurité est localisé dans une seule zone, ou est approché dans plusieurs zones différentes.

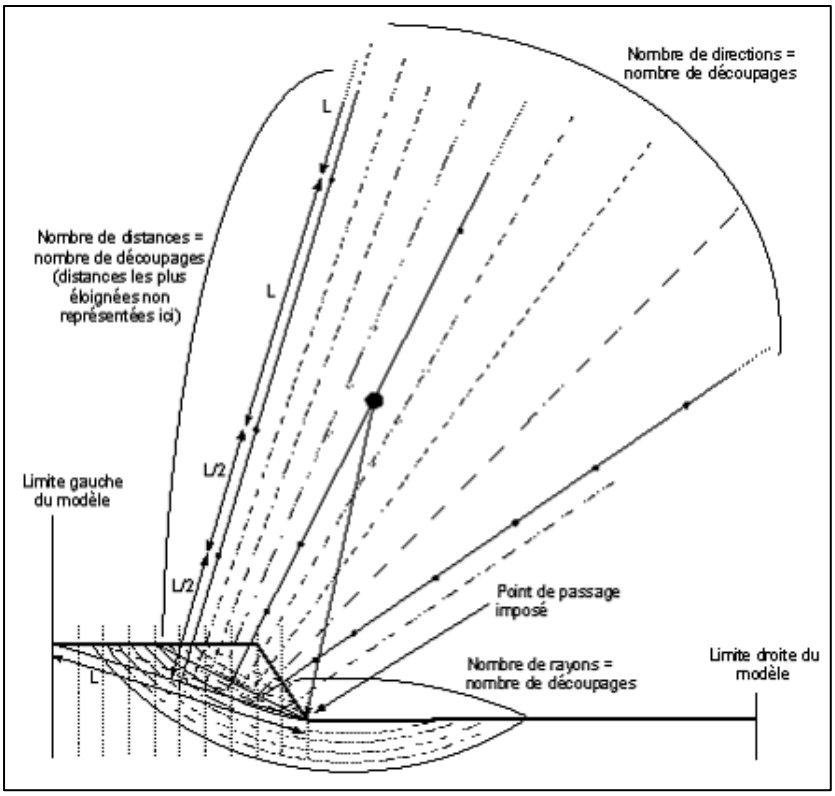

Nombre de directions = nombre de découpages
Nombre de distances = nombre de découpages (distances les plus éloignées non représentées ici)
L
L
L/2
L/2
L
Limite gauche du modèle
Point de passage imposé
Nombre de rayons = nombre de découpages
Limite droite du modèle

Figure 9 – Principe de balayage pour la recherche automatique du cercle critique, avec point de passage imposé pour le 1er cercle : premier niveau de balayage

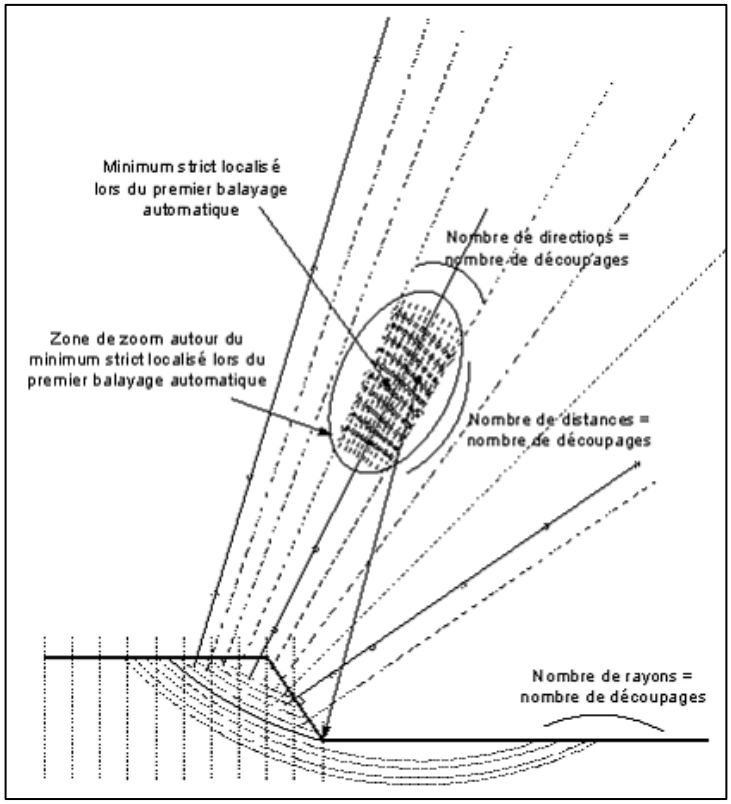

Minimum strict localisé lors du premier balayage automatique
Nombre de directions = nombre de découpages
Zone de zoom autour du minimum strict localisé lors du premier balayage automatique
Nombre de distances = nombre de découpages
Nombre de rayons = nombre de découpages

Figure 10 – Principe de balayage pour la recherche automatique du cercle critique, avec point de passage imposé pour le 1er cercle : deuxième niveau de balayage ("zoom")

Finalement, l'utilisateur doit donc définir :

- Le nombre de découpages : ce paramètre détermine la "précision" de la recherche automatique, et conditionne à la fois le nombre de directions utilisées, le nombre de positions des centres utilisés sur chaque direction, et le nombre d'incréments sur le rayon ;
- L'incrément sur le rayon (m) : TALREN effectue automatiquement une incrémentation positive et négative (augmentation et diminution des rayons) ;
- L'abscisse émergence limite X_L (m) : valeur de l'abscisse en-deçà de laquelle les surfaces de rupture ne sont pas prises en compte, si ces surfaces sont entièrement en-deçà de X_L. La valeur X_L permet, dans le cas de talus complexe, d'éliminer certains cercles parasites ;
- Type de recherche – 2 choix sont possibles : point de passage imposé, et cercles tangents à une couche. Il s'agit d'un critère de détermination du premier cercle associé à chaque centre. Pour les cercles suivants associés au même centre, il y a incrément sur le rayon (et le critère n'est donc plus respecté).

  Le type de recherche conditionne les données supplémentaires demandées à l'utilisateur :

  - Point de passage imposé : dans ce cas, il faut définir ce point de passage imposé ;
  - Cercles tangents à une couche de sol : dans ce cas, il faut choisir dans la liste des couches définies dans le projet la couche de tangence pour les cercles.

On peut alors lancer le calcul afin de déterminer le coefficient de sécurité le plus défavorable et le cercle de rupture associé.

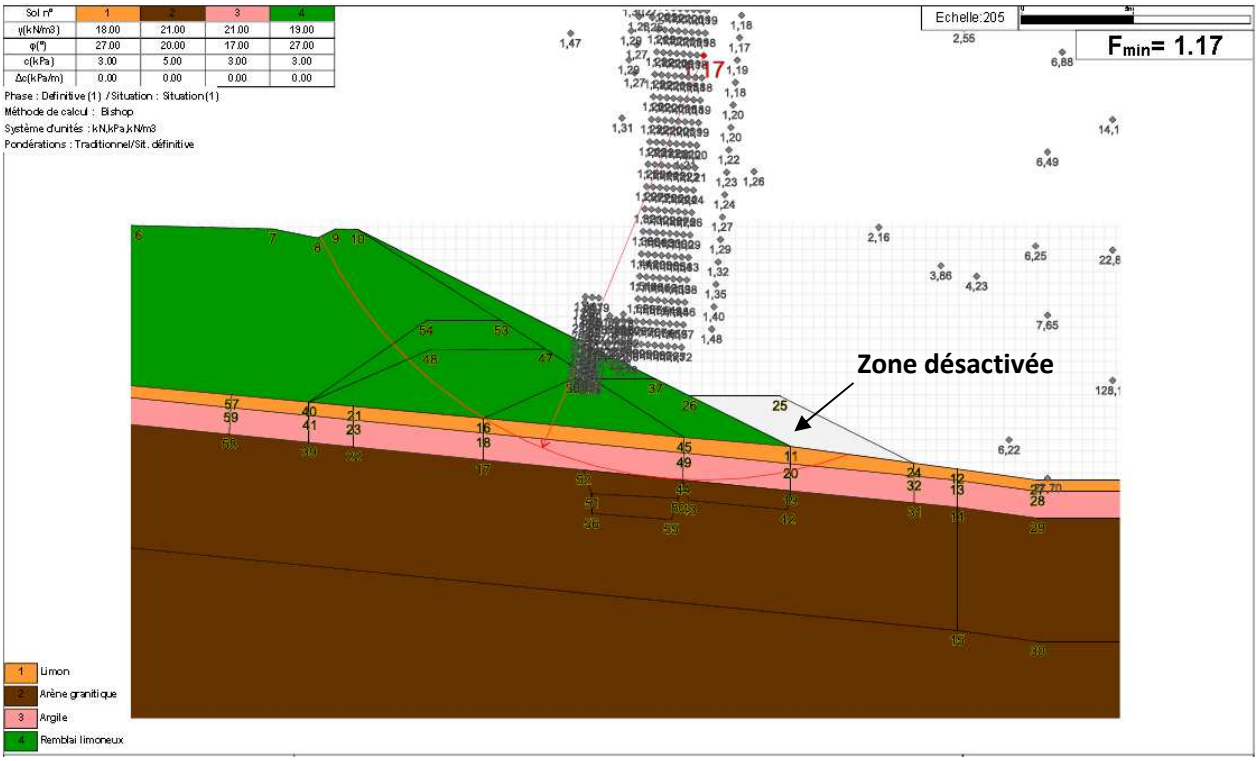


Figure 11 – Exemple de calcul à l'aide du logiciel TALREN

D'après le résultat du calcul précédent, on obtient un coefficient de sécurité : F_{min} = 1.17 en situation permanente, ce qui est insuffisant (F_{lim} = 1.50).

Pour avoir $F_{min} > F_{lim}$, on peut jouer sur :

- La géométrie du talus :
  - Adoucir la pente ;
  - Mettre en place une banquette en pied de talus ;
- Les caractéristiques du sol :
  - S'il s'agit d'un remblai, on peut éventuellement traiter le matériau ;
  - Sinon, on peut substituer un matériau médiocre par un autre de meilleure qualité.

Dans le cas du présent projet, on rappelle que la présence de zones humides à proximité des talus et l'espace foncier limité ne permet pas de modifier la géométrie du profil.

C'est pourquoi, les solutions à envisager sont de type traitement et/ou substitution de sol.
On substitue donc une partie de l'argile et du limon et on met en place un prisme en pied du remblai, tout cela en remblai traité présentant de meilleures caractéristiques intrinsèques (caractéristiques des matériaux précisées dans le tableau en haut à gauche de chaque figure).

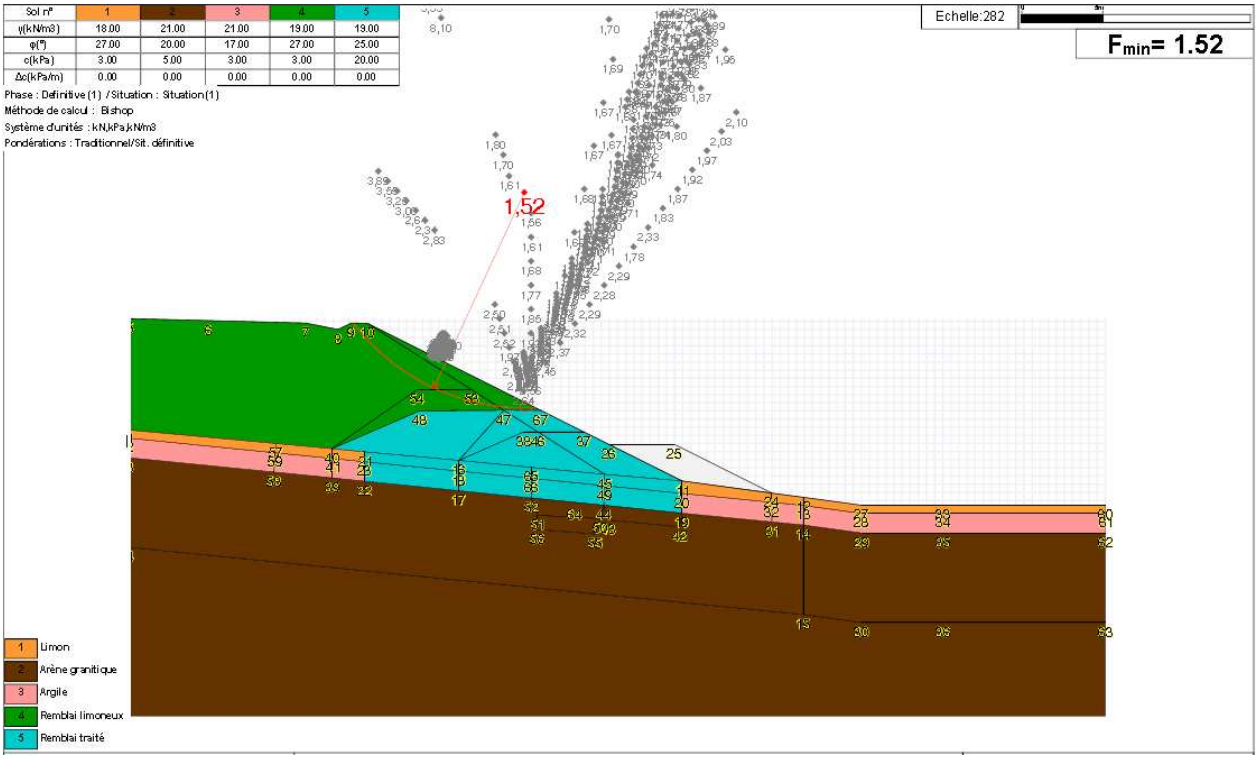


Figure 12 – Profil permettant d'obtenir un coefficient de sécurité suffisant

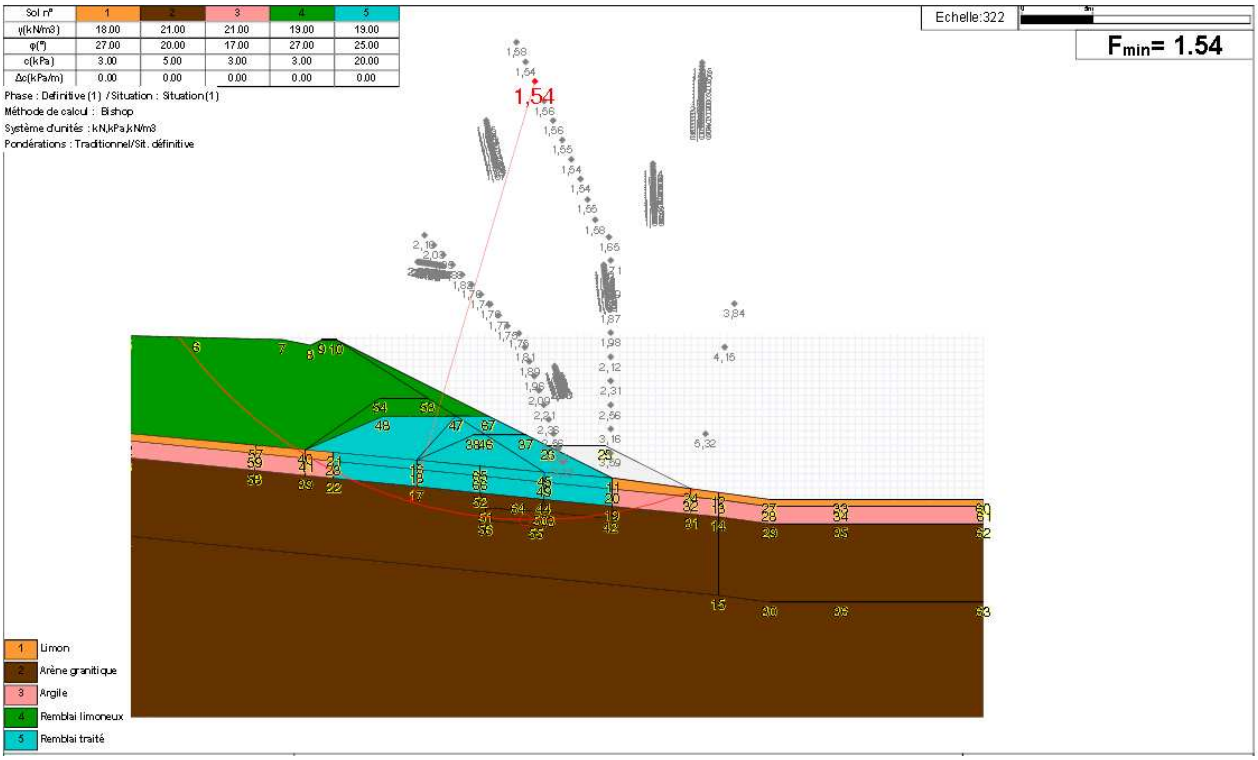


Figure 13 – Profil permettant d'obtenir un coefficient de sécurité suffisant